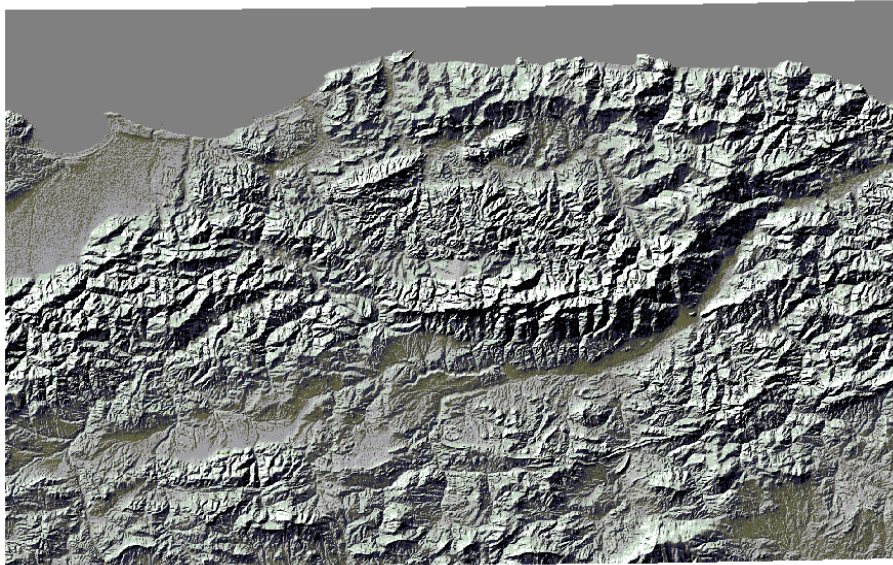




Mémoire de Magister  
Présenté par

**Salima CHARIFI**  
Ingénieur d'Etat en Hydraulique

# Application du modèle hydrologique GR2M sur les bassins versants de la Soummam et de l'Isser



## Jury :

Président :	Mr. A. KHETTAB – Professeur ENP
Directeurs de thèse :	Melle. S. BENMAMAR - Chargée de cours ENP Mr. S. BENZIADA - Chargé de cours ENP
Examineurs :	Mr. Y. MOULOUDI - Chargé de cours ENP Mme N. HADJ-RABIA - Chargée de cours USTHB
Invitée :	Mme B. LARFI - Maître assistante INA

## Remerciements

Je remercie « Allah » de m'avoir donné la volonté et le courage pour réaliser ce travail de recherche.

Je remercie chaleureusement Melle Saadia BENMAMAR, chargée de cours à l'Ecole Nationale Polytechnique d'avoir dirigé ce travail, pour le suivi et ses conseils pour l'amélioration de la qualité de mes recherches, ainsi que pour la confiance qu'elle m'a accordée.

Je tiens à remercier Mer Ahmed KHETTAB, professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, d'avoir présidé le jury de ma soutenance.

Je remercie également Mer Salim BENZIADA, chargé de cours à l'Ecole Nationale Polytechnique, de m'avoir soutenu et conseillé, comme co-promoteur.

J'exprime ma reconnaissance à Mer Yahia MOULOUDI, chargé de cours à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour sa participation au comité de lecture et d'avoir accepté d'être examinateur de mon travail.

Je remercie Mme Nassima HADJ-RABIA, chargée de cours à l'Université des Sciences et de la Technologie- Houari Boumedinne-, d'avoir accepté d'être membre de ce jury. Et sans oublier Mme Bouchra LARFI de l'Institut Nationale Agronomique d'avoir accepté notre invitation.

J'adresse toute ma gratitude à Melle Samia OULD YAHIA, Ingénieur hydrologue au département hydrologie de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, de m'avoir aidé, conseillé et clarifié mes idées dans le domaine de la modélisation hydrologique. Sans oublier Mer BOUDEDJA Mohamed, Ingénieur hydrologue au même département pour ses conseils.

J'adresse ma sincère gratitude à Mer Charles PERRIN, docteur au Cemagref d'Antony en France, d'avoir répondu à mes sollicitations et de m'avoir envoyé des documents, qui m'ont été très utiles dans mon travail de recherche. Ainsi j'ai eu la chance de consulter sa thèse de doctorat sur les modèles hydrologiques, qui s'intitule « Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative ».

J'adresse également ma profonde reconnaissance à Mer Jacques LAVABRE du Cemagref, à Mer Jean Pierre VILLENEUVE professeur et directeur de l'Institut National de la Recherche Scientifique de l'université du Québec-Canada, Mer Jean Pierre FORTIN, professeur honoraire et Mer Taha OUARDA du même institut pour leur aide ; de m'avoir envoyé des documents de référence de mon mémoire.

Merci enfin, à ma famille, ma belle famille, Karima et son mari Mourad, pour leur soutien, encouragements et conseils. A Mama Fatima pour sa relecture et ses observations, pour l'amélioration de mon mémoire. Sans oublier Djamel, mon beau frère, de m'avoir aidé à arranger ce mémoire.

Et pour terminer, une mention spéciale à Mehdi Bellabas, mon mari, qui m'a aidé dans la partie SIG de ce travail et qui m'a soutenue dans cette aventure. Je lui suis très reconnaissante d'avoir supporté mes humeurs.

Je remercie tous ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

## Résumé

La modélisation hydrologique est l'une des disciplines de la science de l'hydrologie. Elle étudie la simulation de la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant.

Il existe un très grand nombre de modèles hydrologiques, ceci est dû à l'accroissement des moyens et des outils de calcul. Parmi ces modèles, les modèles conceptuels globaux, qui modélisent la transformation de la pluie en débit par des agencements de réservoirs interconnectés ; ils sont généralement nommés 'modèles à réservoirs', dont la mise en œuvre nécessite le calage d'un certain nombre de paramètres sur les données réelles ou mesurées. Or ces paramètres n'ont aucune explication physique sur le terrain, c'est-à-dire sur le bassin versant modélisé.

Notre choix de modèle, à caler sur les données hydrométéorologiques des bassins versants de la Soummam et de l'Isser, est le GR2M : modèle conceptuel 'à réservoirs' qui fonctionne à deux paramètres de calage et à un pas de temps mensuel. Vu les résultats satisfaisants, de calage et validation de ce modèle sur nos données, nous avons essayé, à la fin de ce travail, d'utiliser l'information contenue dans les bassins versants étudiés afin d'expliquer les paramètres de calage du modèle par les régressions linéaires.

En complément de cela, l'outil SIG 'Systèmes d'Information Géographiques' a été utilisé pour la représentation des caractéristiques générales des bassins versants étudiés, ainsi que les cartes de MNT 'Modèle Numérique de Terrain', relief, pentes, expositions, ..etc. L'intérêt de l'utilisation des SIG en hydrologie y est également exposé.

**Mots clés** : modélisation hydrologique, modèle GR2M, bassin versant, paramètres de calage, régression linéaire, Systèmes d'Information Géographiques.

## Summary

Hydrological modeling is one of the disciplines of the science of hydrology. It studies the simulation of the transformation of the rainfall into flow on the scale of the catchment area.

There is a very great number of hydrological models, this is due to the increase in the means and the computational tools. Among these models, the total conceptual models, which model the transformation of the rain into flow by fittings of interconnected tanks, they are generally named ' model with tanks ', whose implementation requires the chock of a certain number of parameters on the real or measured data. However these parameters do not have any physical explanation on the ground, i.e. on the modelled catchment area.

Our choice of model, to fix on the hydrometeorological data of the catchments of Soummam and Isser, is the GR2M: conceptual model ' with tanks ' which functions with two parameters of chock and a step of monthly time. Considering the satisfactory results, of chock and validation of this model on our data, we tested, at the end of this work, to use the information contained in the studied catchments in order to explain the parameters of chock of the model with linear regressions.

In complement of that, tool GIS 'Géographic Information systems' is used for the representation of the general characteristics of the basins studied , as well as the charts of Digital Elevation Model DEM, relief, slopes, expositions, ..etc. The interest of the use of the GIS in hydrology is also exposed there.

**Key words:** hydrological modelling, GR2M model, catchment, chock parameters, linear regression, Geographic Information Systems.

# TABLE DES MATIERES

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre 1 : Modélisation hydrologique et modèles pluie-débit</b> .....	4
<hr/>	
1.1. Introduction .....	4
1.2. Objet de l'hydrologie.....	4
1.3. Qu'est ce qu'un modèle ?.....	5
1.4. Définition de la modélisation pluie-débit.....	6
1.5. Objet et enjeux de la modélisation pluie-débit .....	7
1.6. Evolution de l'utilisation des modèles : Systématisation historique.....	8
1.7. Une classification des modèles pluie-débit.....	9
1.7.1. Les modèles 'boite-noire'(blackbox) .....	9
1.7.2. Les modèles 'à réservoirs', conceptuels ou empiriques .....	12
1.7.3. Modèles fondés sur la physique.....	13
1.8. Mise en œuvre des modèles.....	16
1.9. Choix et usage.....	17
1.10. Conclusion .....	18
<b>Chapitre 2 : Aperçu bibliographique des modèles conceptuels et choix du modèle</b> .....	19
<hr/>	
2.1 Introduction .....	19
2.2. Quelques Modèles conceptuels au pas de temps mensuel .....	20
2.2.1. Modèle ABCD (Thomas, 1981).....	20
2.2.2. Modèle de Vandewiele et al. (1991) .....	22
2.2.3. Modèle de Gardner (Bhaskar, 1999) .....	24
2.2.4. Modèle de Guo (2002) .....	26
2.2.5. Modèles 'Cemagref Antony' ou 'GR' .....	27
2.2.5.1. Historique des modèles hydrologiques 'GR' .....	27
2.2.5.2. Humidité du bassin versant et modélisation pluie-débit .....	30
2.2.5.3. Architecture des modèles 'GR'.....	31
2.2.5.4. Récapitulatif des modèles 'GR'.....	37
2.3. Choix du modèle .....	38
2.4. Méthodologie de modélisation.....	42
2.4.1. Le calage du modèle GR2M .....	42
2.4.2. Choix de la variable cible.....	42
2.4.3. Choix de la fonction de critère .....	43
2.4.4. Initialisation du système et période de mise en route.....	44
2.5. Conclusion .....	44

---

### **Chapitre 3 : Présentation des caractéristiques des bassins versants de la Soummam et de l'Isser**..... 45

3.1. Présentation du bassin de la Soummam.....	45
3.1.1. Caractéristiques physiographiques.....	45
3.1.1.1. Position Géographique.....	45
3.1.1.2. Morphologie et Orographie.....	45
3.1.1.3. La courbe hypsométrique.....	48
3.1.1.4. Caractéristiques agro-pédo-géologique.....	50
3.1.1.5. Aperçu Hydrogéologique.....	52
3.1.1.6. Hydrographie et paramètres morphométriques.....	53
3.1.1.7. Aperçu Climatique.....	58
3.2. Présentation du bassin versant de l'Isser.....	61
3.2.1. Caractéristiques Physiographiques.....	61
3.2.1.1. Position Géographique.....	61
3.2.1.2. Morphologie et Orographie.....	61
3.2.1.3. Courbe hypsométrique.....	62
3.2.1.4. Caractéristiques agro-pédo-géologique.....	62
3.2.1.5. Aperçu Hydrogéologique.....	65
3.2.1.6. Hydrographie et paramètres morphométriques.....	65
3.2.1.7. Aperçu climatique.....	67
3.3. Conclusion.....	68

### **Chapitre 4 : Les Systèmes d'Information Géographiques et leur application en hydrologie**..... 69

4.1. Introduction.....	69
4.2. Mise en œuvre des SIG.....	70
4.3. Généralités : Les systèmes d'informations.....	71
4.4. L'information géographique.....	73
4.5. Historique des SIG.....	75
4.6. Quelques concepts.....	75
4.7. Les SIG en hydrologie.....	79
4.8. Conclusion.....	82

### **Chapitre 5 : Application du modèle et optimisation des paramètres de calage**..... 83

5.1. Introduction.....	83
5.2. Description de l'échantillon de données.....	83
5.2.1. Les données Pluviométriques.....	84
5.2.2. L'évapotranspiration potentielle.....	87
5.2.3. Les données hydrométriques.....	88
5.3. Optimisation des paramètres de calage du modèle.....	90
5.4. Critères de calage.....	90
5.5. Résultats et interprétation.....	92
5.5.1. Présentation des résultats numériques.....	94
5.5.2. Présentation des résultats graphiques.....	96
5.5.3. Extension des séries des apports.....	106
5.6. Conclusion.....	106

<b>Chapitre 6 : Utilisation dans un modèle hydrologique de l'information contenue dans des descripteurs du bassin versant</b> .....	107
6.1. Introduction.....	107
6.2. Approches de régionalisation.....	107
6.3. Les méthodes relatives à la régression .....	109
6.3.1. Présentation générale.....	109
6.3.2. Les conditions d'application.....	109
6.3.3. Régression simple.....	110
6.3.4. Régression multiple.....	111
6.4. Application aux bassins versants de la Soummam et de l'Isser.....	115
6.4.1. Choix et analyse de variables explicatives .....	115
6.4.2. Recherche de relations entre paramètres du modèle et variables explicatives .....	117
6.4.3. Régressions sur les paramètres transformés.....	118
6.5. Vérification directe .....	121
6.6. Interprétation des résultats .....	122
6.7. Conclusion.....	123
<b>Conclusion générale</b> .....	124
<b>Bibliographie</b> .....	126
<b>Annexes</b> .....	132



**LISTES DES TABLEAUX**

<b>N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
2.1	Récapitulatif des modèles 'GR'	37
3.1	Caractéristiques des bassins de la Soummam et de l'Isser	49
3.2	Paramètres morphométriques des bassins de la Soummam et de l'Isser	58
5.1	Caractéristiques des sous-bassins retenus	84
5.2	Caractéristiques des stations pluviométriques retenues du bassin de la Soummam	85
5.3	Caractéristiques des stations pluviométriques retenues du bassin de l'Isser	85
5.4	Caractéristiques des stations hydrométriques retenues du bassin de la Soummam	88
5.5	Caractéristiques des stations hydrométriques retenues du bassin de l'Isser	89
5.6	Paramètres optimisés du modèle GR2M	93
5.7	Résultats de calage en mensuel	94
5.8	Résultats de calage en annuel	95
5.9	Résultats de validation en mensuel	95
5.10	Résultats de validation en annuel	95
6.1	Caractéristiques des bassins utilisés pour la prédétermination des paramètres	115
6.2	Matrice de corrélation entre paramètres	116
6.3	Matrice de corrélation entre variables explicatives	116
6.4	Récapitulatif du modèle de régression de $X_1$	118
6.5	Analyse de la variance ANOVA et test de significativité correspondant de $X_1$	118
6.6	Coefficients de régression du paramètre $\ln(X_1)$	118
6.7	Récapitulatif du modèle de régression de $X_2$	119
6.8	Analyse de la variance ANOVA et test de significativité correspondant de $X_2$	120
6.9	Coefficients de régression du paramètre $\ln(X_2)$	120

**LISTE DES FIGURES**

<b>N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
1.1	Cycle de l'eau	7
1.2	Code MIKE-SHE	16
2.1	Architecture du Modèle ABCD	22
2.2	Architecture du modèle de Vandewiele et al.	24
2.3	Architecture du modèle de Gardner	25
2.4	Architecture du modèle de Guo	26
2.5	Evolution des travaux des modèles 'GR'	29
2.6	Architecture du modèle GR2	31
2.7	Architecture du modèle de prévision d'étiage GR3	32
2.8	Architecture du modèle GR3M	33
2.9	Architecture du modèle GR2M	35
2.10	Schéma conceptuel du modèle GR2M modifié	39
3.1	Carte de situation des bassins étudiés	46
3.2	Carte des sous-bassins versants de la Soummam	48
3.3	Courbe hypsométrique du bassin de la Soummam	49
3.4	Carte géologique du bassin versant de la Soummam	51
3.5	Carte des sols du bassin de la Soummam	52
3.6	Carte du réseau hydrographique du bassin de la Soummam	54
3.7	Définition des ordres du réseau selon la méthode de Strahler	55
3.8	Classification du réseau hydrographique de la Soummam selon Strahler	56
3.9	Etages bioclimatiques du bassin de la Soummam	60
3.10	Carte des isothermes annuelles du bassin de la Soummam	60
3.11	Carte des sous-bassins versants de l'Isser	61
3.12	Courbe hypsométrique du bassin de l'Isser	62
3.13	Aperçu géologique du bassin de l'Isser	63
3.14	Carte des sols du bassin de l'Isser	64
3.15	Carte du réseau hydrographique du bassin de l'Isser	66
3.16	Carte de classification du réseau hydrographique de l'Isser selon Strahler	67
5.1	Pluviométrie moyenne annuelle du bassin de la Soummam	86
5.2	Pluviométrie moyenne annuelle du bassin de l'Isser	86
5.3	Evapotranspiration moyenne annuelle du bassin de la Soummam	87
5.4	Evapotranspiration moyenne annuelle du bassin de l'Isser	88

<b>N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
5.5	Apport moyen annuel du bassin de la Soummam	89
5.6	Apport moyen annuel du bassin de l'Isser	89
5.7	Feuille Excel du modèle GR2M	92
5.8	Gain obtenu en calant le paramètre A en calage	93
5.9	Gain obtenu en calant le paramètre A en validation	93
5.10	Baisse du critère de Nash de la période de calage à la validation	94
5.11	Calibration du modèle GR2M sur les données de la station 090101	96
5.12	Validation du modèle GR2M sur les données de la station 090101	96
5.13	Calibration du modèle GR2M sur les données de la station 090305	97
5.14	Validation du modèle GR2M sur les données de la station 090305	97
5.15	Calibration du modèle GR2M sur les données de la station 090309	98
5.16	Validation du modèle GR2M sur les données de la station 090309	98
5.17	Calibration du modèle GR2M sur les données de la station 090408	99
5.18	Validation du modèle GR2M sur les données de la station 090408	99
5.19	Calibration du modèle GR2M sur les données de la station 090501	100
5.20	Validation du modèle GR2M sur les données de la station 090501	100
5.21	Calibration du modèle GR2M sur les données de la station 150106	101
5.22	Validation du modèle GR2M sur les données de la station 150106	101
5.23	Calibration du modèle GR2M sur les données de la station 150601	102
5.24	Validation du modèle GR2M sur les données de la station 150601	102
5.25	Calibration du modèle GR2M sur les données de la station 150702	103
5.26	Validation du modèle GR2M sur les données de la station 150702	103
5.27	Calibration du modèle GR2M sur les données de la station 150901	104

<b>N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
5.28	Validation du modèle GR2M sur les données de la station 150901	104
5.29	Calibration du modèle GR2M sur les données de la station 151001	105
5.30	Validation du modèle GR2M sur les données de la station 151001	105
6.1	Lien entre les variables S et CIP	116
6.2	Lien entre les variables PAM et CIP	117
6.3	Graphe de corrélation entre valeurs réelles de $X_1$ calées et calculées par l'équation de prédétermination	119
6.4	Graphe de corrélation entre valeurs réelles de $X_2$ calées et calculées par l'équation de prédétermination	120
6.5	Comparaison des valeurs de Nash pour les paramètres calés et calculés	121
6.6	Comparaison des valeurs de Nash pour les paramètres calés et calculés	122

## **Introduction générale**

L'eau, source de vie, n'est pas seulement une ressource, elle est un enjeu de civilisation et un potentiel économique considérable. Constituée de petites molécules  $H_2O$ , cette eau est indispensable pour le développement de la vie sur terre. La rareté de l'eau douce et son inégale répartition géographique provoquent des conflits juridiques et politiques entre de nombreux pays et bien des communautés humaines. La variabilité de sa disponibilité est également source de problèmes : trop rare, elle entraîne des situations de pénurie, de désertification, d'exode de populations ; trop abondante, elle est la cause d'inondations catastrophiques et rappelle à l'homme l'impossibilité d'en maîtriser les forces.

Devant l'accroissement de la population humaine sur terre, l'eau devient de plus en plus, une denrée convoitée. L'eau est tellement précieuse que l'or a pris la couleur bleue. Ainsi, la demande en eau est en éternel accroissement, cela est dû à la multiplication des usages (consommation domestique, agriculture, industrie, loisirs, etc.), les problèmes de pollution environnementaux et la nécessité de réaliser des aménagements hydrauliques plus performants.

L'étude de la science de l'eau nécessite la connaissance et la maîtrise du cycle de l'eau. Pour établir le cycle hydrologique, il faut connaître les formes d'existence de l'eau dans la nature: océans, rivières, lacs mais également glaciers, sols, air, eaux souterraines. Il faut également quantifier les volumes et les flux d'eau.

Vers les années cinquante, le concept de « modèle » apparaît en science hydrologique. La modélisation pluie-débit a pris une dimension tellement importante qu'on la surnomme le 'cœur' même de l'hydrologie. Il s'agit d'une représentation mathématique simplifiée de tout ou partie des processus du cycle hydrologique par un ensemble de concepts hydrologiques exprimés en langage mathématique et reliés entre eux dans des séquences temporelle et spatiale correspondant à celles que l'on observe dans la nature.

Il existe aujourd'hui un très grand nombre de modèles, classés dans différentes catégories, à savoir, déterministes ou stochastiques, globaux ou distribués, cinématiques ou dynamiques, et enfin empiriques ou physiques, cela est dû notamment à la nature des variables ou paramètres y intervenant, le bassin versant considéré comme entité homogène ou discrétisé, l'évolution temporelle du système modélisé, et aux relations utilisées dans la modélisation de la pluie en débit.

Le modèle hydrologique est devenu un outil indispensable pour divers domaines : aménagement, construction des ouvrages hydrauliques, prévention et prédétermination des crues, études des changements climatiques, impacts anthropiques, impacts des catastrophes naturelles, reconstitution des climats par la paléontologie....

La connaissance régionale des écoulements de surface, notamment en Algérie devient très indispensable pour la gestion de la ressource en eau. Or la qualité des données observées (non continues, entachées d'erreurs de mesure ou de saisie, etc.) fait que la détermination des débits d'écoulements soit très difficile à réaliser voire impossible. Pour cela, le recours à une modélisation hydrologique pour la simulation de la pluie en débit est fortement nécessaire.

Notre travail de recherche s'inscrit dans la modélisation de la transformation de la pluie en débit dans les bassins versants de la Soummam et de l'Isser. L'objectif principal est la validation du modèle conceptuel mensuel nommé GR2M, à deux paramètres de calage, sur les données observées de ces bassins.

Ainsi, nous commençons par la définition de la science hydrologique dont la modélisation mathématique des phénomènes hydrologiques intervenant dans la transformation de la pluie en débit. Une classification des modèles hydrologiques est donnée au premier chapitre ainsi qu'aux avantages et limitations de chaque catégorie.

En partant de l'aperçu bibliographique des modèles conceptuels globaux au pas de temps mensuel, au chapitre deux, nous avons présenté les raisons du choix du modèle GR2M avec sa nouvelle version 2002. Une méthodologie de modélisation y est aussi proposée, à la fin de ce chapitre.

Ensuite nous présenterons, aux chapitres trois et quatre les différentes caractéristiques des bassins étudiés, la Soummam et l'Isser, dont la physiographie, la géologie, la pédologie, l'hydrogéologie, l'hydrographie et paramètres morphométriques. Les cartes présentées ont été réalisées à l'aide de l'outil SIG 'Systèmes d'Information Géographiques' ArcView et MapInfo ; carte du MNT (Modèle Numérique de Terrain), de relief, des pentes et des expositions. Ainsi qu'un drapage des cartes au 3D.

Au cinquième chapitre, une description de l'échantillon de données utilisées est présenté avec les étapes suivies pour l'optimisation des paramètres du modèle GR2M sur ces données. Vers la fin de cette partie du travail, les résultats numériques et graphiques du calage et de la validation du modèle ainsi que leurs interprétations sont exposés.

Enfin, dans le dernier chapitre de ce travail, nous essayerons d'expliquer les paramètres de calage du modèle hydrologique utilisée, en exploitant les informations sur les bassins versants étudiés ; cela permettra l'application de ce modèle sur les bassins versants non jaugés ; où les données nécessaires pour le calage des paramètres ne sont pas disponibles.

# Chapitre 1

## Modélisation hydrologique et modèles pluie-débit

### 1.2. Introduction

Selon l'Organisation Météorologique Mondiale, la surface terrestre reçoit quotidiennement en moyenne des centaines de milliers de m<sup>3</sup> d'eau sous forme de précipitations. A cause de la répartition hétérogène de ces dernières, il existe aussi bien des régions dont le climat est très sec que des régions bénéficiant d'apports pluviométriques intenses. On peut donc assister quotidiennement dans différentes parties de la terre à une vingtaine de drames où l'eau quitte le lit des cours d'eau et devient un élément dangereux pour l'homme et ses biens.

Le cours d'eau constitue donc, un objet d'intérêt privilégié, du fait que la connaissance de son débit est un instrument indispensable, de nos jours, à la gestion de la ressource en eau et des systèmes aquatiques, notamment pour la gestion d'ouvrages de retenue, le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques et pour la prévision de débits. Dans ce contexte, de nombreuses recherches se sont attachées, depuis plus de cent ans, à essayer de comprendre les processus de génération des débits et le fonctionnement du bassin versant, et ceci en remontant à leur cause première, les pluies. Ces recherches ont donné naissance aux modèles hydrologiques appelés, modèles pluie-débit, dont le but est d'étudier le lien entre la pluie et le débit, dans un système hydrologique qui est le bassin versant.

On se propose, dans ce chapitre, de définir la modélisation hydrologique, de la situer dans le contexte de l'hydrologie et de présenter les différentes classes de modèles pluie-débit.

### 1.2. Objet de l'hydrologie

L'hydrologie n'est pas une science unifiée. Ethymologiquement, l'hydrologie est la science qui traite les eaux. Dans les dictionnaires, elle est parfois définie comme la



science qui étudie les eaux, leurs caractéristiques, leurs propriétés, s'appuyant sur des considérations physiques, météorologiques, géologiques ou chimiques.

Le sujet d'intérêt fondamental de l'hydrologie est le cycle de l'eau, dont les thèmes sont les précipitations, l'évaporation, l'infiltration, le ruissellement, les écoulements dans les nappes et les cours d'eau, et le transport de substances dissoutes ou en suspension (Dooge, 1988). Du fait de l'étendue de ces centres d'intérêt, l'hydrologie est donc une science pluridisciplinaire comprenant l'hydrologie de surface, la glaciologie, l'hydrogéologie, la nivologie, la physico-chimie, en incluant aussi l'étude de l'érosion ou du transport des sédiments. Mais elle est également plus ou moins directement liée à la météorologie, l'hydraulique, la géographie, la géologie, la biologie ou l'écologie.

Le moteur de cette science réside principalement dans le lien étroit qui existe entre l'homme et son environnement, et en particulier dans la dépendance qu'il a vis-à-vis de la ressource en eau, pour ses besoins d'alimentation ou dans ses activités. La variabilité de cette ressource dans le temps est source de multiples problèmes de gestion, auxquels l'hydrologie peut contribuer à apporter des solutions (Michel, 1989).

### 1.3. Qu'est ce qu'un modèle ?

On appelle modèle une représentation qui décrit les relations entre les différents éléments d'un système. En particulier, un modèle hydrologique de bassin versant est une représentation simplifiée du cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant, afin d'expliquer la réponse du bassin aux différentes conditions auxquelles il est soumis. La représentation de tout ou partie du cycle de l'eau (démarche de modélisation) à des fins variées, se heurte à la difficulté d'appréhension, de description ou de compréhension des phénomènes et des systèmes étudiés. Par conséquent, les représentations de ces systèmes, c'est à dire des modèles, sont nécessairement simplificatrices, réductrices de la complexité naturelle, et donc grossièrement inexactes.

Le modélisateur opère des choix de représentation du système en ne retenant que les aspects qui lui semblent les plus pertinents, pour tendre vers une solution la moins inexacte possible. Le développement du modèle repose généralement sur trois éléments (Perrin, 2000) :

1. le système observé et sa discrétisation spatiale et temporelle, qui en définissent l'objet et ses limites (spatiales ou temporelles). La connaissance du système est conditionnée par la mesure de ses caractéristiques et l'acquisition de données sur les flux, les stocks et les transformations de phase. Dans notre cas le système étudié est le bassin versant.

2. l'objectif de modélisation, pour lequel le modèle est développé. Le modèle est construit pour répondre à des questions et peut ainsi, au delà d'un outil de représentation, être également un instrument de connaissance (recherche de la représentation de la transformation de la pluie en débit).
3. le choix d'une formulation de la réalité. Après la définition des deux points précédents, l'essentiel de la démarche de modélisation consiste à trouver la formulation de la réalité la plus satisfaisante relativement aux objectifs fixés. La formulation d'un modèle est conditionnée par la connaissance antérieure des processus ou des systèmes considérés, par les idées et l'imagination du modélisateur et par les hypothèses qui sont formulées.

#### 1.4. Définition de la modélisation pluie-débit

La modélisation est la représentation mathématique simplifiée d'un phénomène physique permettant d'en simuler le fonctionnement pour étudier l'effet de certains paramètres, ou faire des prévisions (Bourrier, 1991). Lorsque l'on veut décrire, d'une manière rationnelle, le phénomène, on réalise au moins les deux opérations suivantes:

- Mettre un nom sur des objets, définir des groupes d'objets dans un langage clair;
- Relier ces différents éléments au moyen de relations.

La représentation de l'ensemble des phénomènes hydrologiques et des systèmes hydrauliques d'une manière simple et précise constitue une modélisation pouvant avoir une interprétation mathématique. En effet, l'ensemble du processus illustré dans la figure (1.1) est une structure dynamique dans l'espace et dans une échelle de temps bien définie entre: une entrée: cause (pluie) et une sortie: effet (écoulement)

Considérons une pluie d'intensité  $P(t)$  tombant sur une surface  $S$  est désignons par  $E(t)$  et  $I(t)$  les intensités d'évaporation et d'infiltration.

Le volume  $W(t)$  d'eau entrée dans le cours d'eau ou le réseau à l'instant  $t$  vérifie l'équation:

$$W(t + \Delta t) - W(t) = S[P(t) - E(t) - I(t)]\Delta t \quad \text{Eq. (1.1)}$$

Ou en notation différentielle:

$$\frac{dW}{dt} = S[P(t) - E(t) - I(t)] \quad \text{Eq. (1.2)}$$

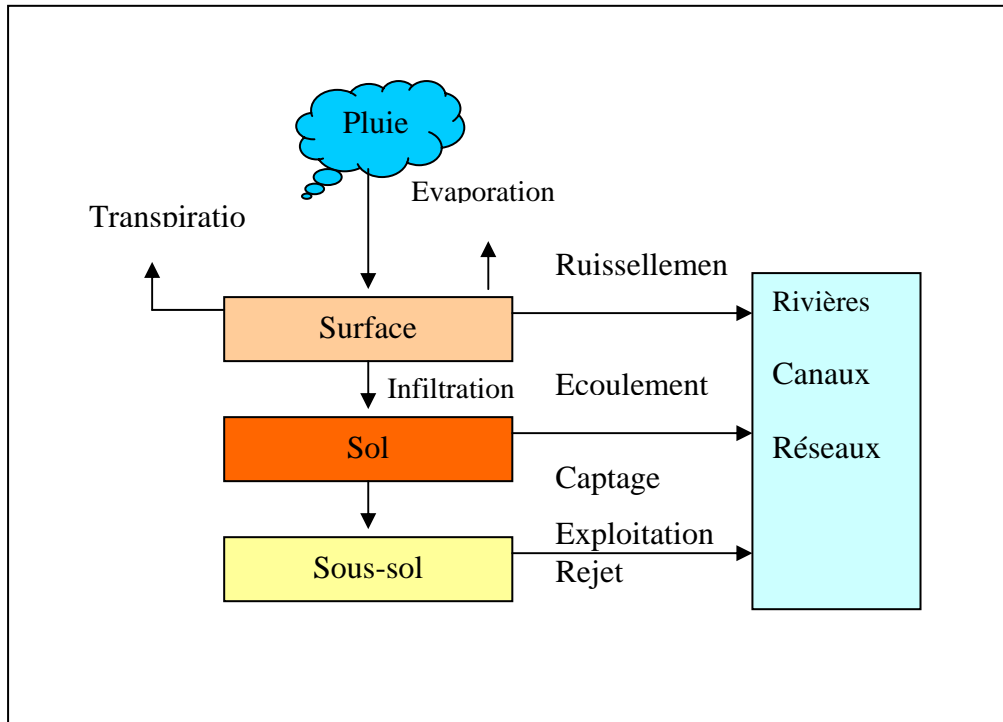


Figure 1.1. : Cycle de l'eau

Ainsi, l'état initial  $t_0$  et les états successifs du système sont analytiquement traduisibles par une fonction dont les principaux paramètres sont: la transmissibilité, les coefficients des pertes, rétentions, etc. et la propagation des flux de l'écoulement.

### 1.5. Objet et enjeux de la modélisation pluie-débit

L'objet d'étude des modèles pluie-débit est le bassin versant ; défini relativement à un point sur un cours d'eau, comme l'ensemble des terres drainées par le réseau hydrologique situé en amont de ce point. Le bassin versant est un système ouvert, avec des échanges d'eau et d'énergie avec l'atmosphère, le sous-sol et l'aval du cours d'eau ou la mer.

Les objectifs d'un modèle hydrologique peuvent être de connaître le fonctionnement d'un bassin versant, prévoir des débits en fonction des scénarii météorologiques ou d'aménagement, simuler des débits sur des cours d'eau où les mesures sont insuffisantes, modéliser le transport de polluants . L'applicabilité de la modélisation dépend de l'étalonnage (l'ajustement aux paramètres d'entrée), de la validation (qui permet d'évaluer les possibilités d'utilisation) et de la mesure de la sensibilité du modèle (l'étude de l'influence des variations des paramètres d'entrée sur les paramètres de sortie) (J.Charleux ; 2001). Ceci dit, on peut distinguer les problématiques suivantes :

- Simulation de débits, pour le comblement de lacunes dans les séries de données, la reconstitution de débits historiques (les données de pluie étant souvent disponibles sur des périodes beaucoup plus longues que les débits) ou pour permettre des traitements statistiques ;
- Prédétermination des débits de crue ou d'étiage qui peut permettre le dimensionnement d'ouvrages et de réservoirs ou d'aménagement dans le lit (mineur à majeur) du cours d'eau ;
- Prévision des crues et des étiages ; il s'agit d'évaluer par avance, connaissant l'état du bassin, les débits de crues susceptibles de présenter des risques (inondation) ou les débits d'étiage pouvant demander de mettre en place une gestion particulière de la ressource en eau ;
- Influence d'aménagement sur l'hydrologie : on désire pouvoir prédire les changements de la réponse du bassin suite à des modifications des caractéristiques du bassin d'origine humaine ou à des changements environnementaux.

Ces problématiques font ressortir deux aspects importants, celui de l'évaluation du risque et celui de la gestion de la ressource. La pertinence des réponses que l'on peut leur apporter est conditionnée par celle du modèle dans sa représentation du bassin relativement aux objectifs fixés (Perrin, 2000).

### ***1.6. Evolution de l'utilisation des modèles : Systématisation historique***

La modélisation mathématique en hydraulique et hydrologie au sens moderne du terme, c'est-à-dire en utilisant les ordinateurs digitaux, date des années 1950. C'est en 1952-53 que le groupe de chercheurs de l'université de New York (Stoker, Isaacson et Troesch) a pu construire, en écrivant un programme et en utilisant un ordinateur, un modèle moderne de la propagation des crues le long d'un tronçon du Mississippi, incluant sa confluence avec l'Ohio. Depuis, les modèles ont subi une série de transformations, passant par quatre générations :

- Première génération : des formules numérisées. Cette génération est maintenue jusqu'au début des années 60 ;
- deuxième génération : des modèles numériques spécifiques, dédiés. Il s'agissait de programmes créés à cette fin unique et demandant des modifications importantes dès que l'on voulait les utiliser pour une autre application. Cette génération a régné sans conteste entre 1960 et 1970 ;
- troisième génération : des systèmes généraux de modélisation. Un système, conçu pour simuler la propagation des crues, permet aussi bien de construire un modèle de la Seine qu'un modèle du Niger. Ces systèmes ont été utilisés à partir de 1965 jusqu'à 1995 ;
- quatrième génération : les progiciels véritables, des systèmes généraux de modélisation exploités d'une manière conversationnelle.

Le passage d'une génération à l'autre a été conditionné par les développements de la technologie des ordinateurs, lesquels ont alors créé le nouveau concept de progiciels. Du point de vue de l'hydraulique ou de l'hydrologie, il n'y a pas de différence entre les systèmes de troisième et quatrième génération, les derniers ont en général été dérivés directement des précédents. Du point de vue de l'utilisateur, par contre, la différence est grande. Les premiers systèmes de 4<sup>ème</sup> générations sont apparus aux environs des années 1986-87. Commercialement, ils visent un large public d'utilisateurs et doivent, par définition, être bon marché, pouvoir être implantés sur des stations de travail sous MS-DOS ou sous UNIX.

### 1.7. Une classification des modèles pluie-débit

Beaucoup de classifications des modèles hydrologiques ont été proposées ; la difficulté de trouver une classification unifiée provient du fait de la grande diversité des approches entraînant une non moins grande diversité des caractéristiques des modèles. Il est alors presque impossible de distinguer des catégories de modèles nettement distinctes (Perrin, 2000), et ce d'autant plus que la terminologie employée est encore fluctuante. Clarke (1973) et Ambroise (1998) ont proposé quelques clés de différenciation des modèles :

- Déterministes ou stochastiques, suivant la nature des variables, des paramètres et/ou des relations entre eux,
- Globaux, semi-distribués ou spatialisés, suivant que le bassin versant est considéré dans l'espace comme une entité homogène, qu'il est divisé en sous-unités supposées homogènes (éventuellement des sous-bassins) ou qu'il est finement discrétisé en mailles,
- Cinématiques (descriptifs) ou dynamiques (explicatifs), suivant que l'évolution temporelle du système est simplement décrite ou mise en relation avec les forces qui en sont la cause,
- Empiriques, conceptuels ou théoriques (fondés sur la physique), suivant les relations utilisées pour modéliser la transformation de la pluie en débit et suivant la représentation de système modélisé.

Perrin (2000) a proposé une classification simplifiée et assez satisfaisante, dont on distingue trois catégories de modèles, les modèles 'boite-noire', les modèles 'à réservoirs' conceptuels ou empiriques et les modèles fondés sur la physique.

#### 1.7.1. Les modèles 'boite-noire'(blackbox)

Ces modèles ont en commun de ne faire appel qu'aux seules variables d'entrée et de sortie d'un bassin, sans faire intervenir de données sur sa nature physique : le bassin est considéré comme une boite noire (blackbox). Ils s'appuient sur des fonctions et paramètres globaux sans grande signification physique ou non directement reliables

à des propriétés mesurables (Ambroise, 1999), donnant une description purement mathématique du fonctionnement du bassin versant. On classe dans cette catégorie les modèles ou sous-modèles qui établissent un pur lien mathématique entre les variables d'entrée et de sortie du système. Ces modèles sont globaux. Nous en donnons quelques exemples :

### ✚ Les modèles ARMAX (Auto-Regressive Moving Average with exogenous inputs)

Ces modèles autorégressifs à moyenne mobile, sont parmi les plus simples. Initialement développés par Box et Jenkins (1976), ils ont suscité beaucoup d'intérêt, principalement du fait de leur solide fondement mathématique, qui s'appuie sur la théorie des modèles linéaires (modèles de régression et de corrélation). La forme générale du modèle est donnée par l'équation (Salas, 1993) :

$$y_t = \mu + \sum_{j=1}^p \phi_j (y_{t-j} - \mu) + \sum_{j=1}^r \psi_j z_{t-j} + \varepsilon_t - \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} \quad \text{Eq. (1.3)}$$

Où  $\mu$  et  $\psi_1, \dots, \psi_r$  sont des paramètres du modèle, et  $y_t$  et  $z_t$  respectivement la sortie (débit) et l'entrée exogène (pluie) à l'instant  $t$ ,  $\phi_1, \dots, \phi_p$  sont des  $p$  paramètres autorégressifs,  $\theta_1, \dots, \theta_q$  sont  $q$  paramètres de moyenne mobile et le bruit  $\varepsilon_t$  est un processus normal non autocorrélé, de moyenne nulle et non corrélé à  $y_{t-1}, \dots, y_{t-p}$ .

Bien qu'ils aient donné des résultats satisfaisants dans un certain nombre de cas, ces modèles trouvent leurs limites dans le fait que leur linéarité n'est pas adaptée pour représenter la transformation pluie-débit non linéaire. Ils doivent donc être utilisés en combinaison avec des opérateurs de transformation non linéaires (Weeks et Boughton, 1987).

### ✚ Les modèles des réseaux de neurones artificiels

Sont, contrairement aux modèles ARMAX, non linéaires et ne rencontrent pas les problèmes sus-cités. Ils ont été utilisés par de très nombreux auteurs depuis le milieu des années 1990 dans le contexte de la modélisation pluie-débit (Shamseldin, 1997 ; Dawson et Wilby, 1998 ; Coulibaly et al., 2000). Les réseaux de neurones ont une structure mathématique flexible, capables d'identifier des relations non linéaires complexes entre les entrées et les sorties d'un système. Ils imitent, de façon simplifiée, la manière dont les neurones d'un cerveau se comportent.

Ils sont organisés en couches successives de nœuds (neurones) et chaque nœud d'une couche est relié à tous les nœuds de la couche suivante par une relation paramétrée. Ce qui fait que le nombre de paramètres augmente très rapidement lorsque le nombre de nœuds augmente, rendant le système sur-paramétré. Hsu et al

(1995) ont par exemple appliqué des réseaux de neurones comprenant de 33 à 64 paramètres. Par ailleurs, l'utilisation du réseau de neurones suppose que les données soient normées, ce qui pose des problèmes lorsque l'on veut appliquer le modèle sur des données sortant de l'intervalle de variation de celles utilisées pour le calage des paramètres.

### **La méthode de l'hydrogramme unitaire (HU)**

Notamment utilisé dans la fonction de transfert, proposé par Sherman (1932). L'HU tente de représenter l'effet des caractéristiques du bassin sur une entrée unitaire de pluie nette. Simple dans sa conception (il découle de l'interprétation physique des courbes isochrones) et basé comme les modèles ARMAX sur les mathématiques linéaires, il est confronté aux mêmes limitations.

Essentiellement outil de transfert, il doit généralement être couplé à des modules non linéaires qui permettent de convertir la pluie brute en pluie nette (Jakeman et Whitehead, 1996), donc de déterminer la proportion de la pluie en entrée qui contribuera finalement à l'écoulement. Par ailleurs, l'application de l'HU demande la séparation préalable du débit de base, dont la détermination est souvent arbitraire.

### **La méthode DPFT-ERHUDIT (Différentielle Première de la Fonction de Transfert - Excess Rainfall and Unit Hydrograph by a Deconvolution Iterative Identification Technique)**

Cette méthode inspirée des travaux de Newton et Vinyard (1967), a pour but d'essayer de limiter les problèmes liés à l'utilisation des hydrogrammes unitaires (HU), en évitant un choix arbitraire dans la sélection et le calage d'une fonction de production et d'une technique de séparation du débit de base (Rodriguez et al., 1989, 1991 ; Duband et al., 1993). Il s'agit d'une procédure itérative, dans laquelle la première estimation de la pluie nette correspond à la pluie brute. La première fonction de transfert est alors calculée, puis rectifiée par des contraintes physiques.

A partir de cette nouvelle fonction de transfert, on résout alors le problème inverse, c'est-à-dire l'estimation de la pluie nette par déconvolution. La procédure est répétée jusqu'à ce qu'il y ait convergence. Ce modèle, dont le calage repose sur la sélection d'événements de crues, a donné des résultats satisfaisants dans un contexte de prévision de ces événements. Cependant, il doit être considéré comme un modèle de crue puisqu'il est calé sur des événements où le système hydrologique est en état de répondre par une crue à une entrée de pluie (Perrin, 2000). Sa faiblesse dans l'extension à d'autres périodes réside dans l'absence de procédure de suivi d'humidité et Duband et al. (1993) ont remarqué qu'il subissait des ambiguïtés sur la question du débit de base.

Nous pouvons ainsi citer, dans cette classe de modèles 'boite noire', ceux reposant sur une simple équation non linéaire qui donne directement le débit en fonction des pluies antérieures (Tsykin, 1985 ; Pinault et al., 1997).

Les modèles empiriques 'boite-noire' globaux sont très utiles et utilisées en ingénierie hydrologique ; ils constituent des modèles peu complexes et permettent de prédire les flux en sortie d'un bassin versant en fonction de la pluviométrie (flux en entrée). Dans ce cas l'effet des grandeurs variables dans le temps et dans l'espace est paramétrisé de façon globale. Ceci a deux inconvénients majeurs : ces modèles ne nous permettent pas d'apprécier l'importance relative des différents phénomènes à l'intérieur du bassin, et donc dans le milieu étudié ; de plus leur emploi répété suppose une stationnarité du milieu, ce qui dans notre cas est pertinemment faux ; on s'intéresse justement à l'évolution du milieu soumis aux changements.

### 1.7.2. Les modèles 'à réservoirs', conceptuels ou empiriques,

Ces modèles sont schématiquement constitués de réservoirs interconnectés qui assurent la transformation de la pluie en débit. Ils sont moins abstraits que les modèles 'boite noire' dans leur représentation de la transformation pluie-débit, même si leur interprétation physique n'est généralement pas immédiate. Ces modèles sont structurés à partir de deux composants majeurs :

- Un module de production responsable de la détermination des bilans en eau, c'est-à-dire de la répartition de la pluie brute en pluie nette (alimentant le débit), en quantité évaporée et en quantité stockée. Parfois présentes dans les modèles, les fonctions d'échanges en eau, permettant de simuler des pertes et/ou des apports vers ou de l'extérieur, font généralement partie de ce module ;
- Un module de routage ou transfert permettant d'assurer la répartition temporelle de la quantité d'eau transitant dans le cours d'eau.

Les premiers modèles à réservoirs ont été proposés au début des années 60. Ils correspondaient en fait à une simplification des équations de la physique, alors trop complexes pour être utilisées telles qu'elles dans des modèles numériques. Ils essayaient de représenter de façon assez exhaustive tous les processus pouvant influencer les débits et étaient donc très complexes, avec des structures faisant intervenir de nombreux réservoirs et de très nombreux paramètres : le modèle Stanford (Crawford et Linsley, 1963) comprenait plus de 30 paramètres optimisables, le modèle SSARR (Schermerhorn et Kuehl, 1968) plus de 25 paramètres, celui proposé par Girard (1970) plus de 20 paramètres.

Devant les problèmes de calage et d'utilisation de tels modèles, ce sont ensuite des modèles moins complexes (moins de paramètres) qui ont été proposés, c'est le cas des modèles GR3 à 3 réservoirs et 3 paramètres (Edijatno et Michel, 1989) et de ses versions plus récentes et complexes GR4 ou GRHUM (Loumagne et al, 1996).



Ces modèles sont la plupart du temps globaux, ou dans quelques cas semi-distribués ou distribué. Dans ces deux derniers cas, le modèle est appliqué sur chaque sous-bassin ou maille et une méthode de propagation permet d'assurer le transfert des flux entre sous-unités vers l'exutoire. Nous pouvons citer, à titre d'exemple, le cas de TOPMODEL (TOPography-based hydrological MODEL) développé à l'université de Lancaster au Royaume-Uni, ce modèle a été construit sur le concept d'aires contributives variables à l'écoulement (Beven et Kirkby, 1979) ; c'est un modèle conceptuel.

La différence entre les modèles 'à réservoirs' conceptuels et empiriques fait exclusivement référence à la manière dont les modèles ont été développés (Perrin, 2000) :

- La grande majorité des modèles 'à réservoirs' existants sont des modèles conceptuels mis au point à partir de concepts sur la manière dont se passe la transformation pluie-débit. On représente alors dans le modèle de façon simplifiée les processus jugés pertinents pour la modélisation. Le concepteur du modèle introduit des idées a priori, généralement fondées sur les connaissances physiques et l'observation du bassin.
- Beaucoup plus marginaux que les précédents, les modèles empiriques, eux, sont construits seulement à partir des observations hydro-météorologiques (correspondant aux entrées et sorties du modèle), sans avancer d'hypothèses a priori sur la nature des processus dominants ou d'idées préconçues sur la structuration du modèle.

Ces modèles globaux sont simples à utiliser et utiles pour synthétiser l'information climato-hydrologique disponible sur un bassin et simuler l'évolution conjointe des réserves dans chaque compartiment (Ambroise, 1999). Les limites de ces modèles sont cependant nombreuses :

1. L'analogie avec le fonctionnement de réservoirs interconnectés reste une représentation grossière du fonctionnement réel d'un bassin : les relations de vidange utilisées sont empiriques et le plus souvent arbitraires ;
2. Les paramètres utilisés sont généralement sans grande signification physique : n'étant ni mesurables, ni corrélables à des caractéristiques mesurables du bassin ; ils ne peuvent être estimés que par calage du modèle sur des débits mesurés ;
3. Ces modèles ne permettent pas de tenir compte de l'hétérogénéité du bassin et de sa structure, ni d'analyser leur influence sur son fonctionnement.

### 1.7.3. Modèles fondés sur la physique

Contrairement aux modèles précédents qui mettent l'accent sur la représentation du comportement hydrologique final (à l'exutoire), les modèles fondés sur la physique tentent d'utiliser des explications physiques à ce comportement. Ils utilisent le cadre théorique des équations de la physique (équations aux dérivées partielles), avec par

exemple les équations de Saint-Venant pour les écoulements en rivière ou celles de Boussinesq ou Richards pour les écoulements dans les sols saturés ou non saturés.

Ils tiennent compte de la variabilité spatiale du bassin par une discrétisation fine à base de mailles sur lesquelles sont appliquées les lois concernées, ce qui permet de donner une représentation des flux et stocks au sein du bassin. Chacune est caractérisée par un ensemble de paramètres, ayant en principe une signification physique et donc mesurables sur le terrain.

Plusieurs modèles physiques ont été développés, il s'agit à titre d'exemple des modèles SHE (Abbott et al., 1986) présenté dans la figure 2, IHDM (Beven et al., 1987), Swatch (Morel-Seytoux et Al Hassoun, 1989) et du modèle proposé par Kutchment et al. (1996).

### **Présentation du modèle SHE (Système Hydrologique Européen)**

Le SHE offre un cadre informatisé modulaire qui permet l'intégration d'ensembles de sous-modèles mis en œuvre pour chacun des phénomènes physiques qui entrent en jeu. En 1995, il existait deux versions du SHE (J.A. Cunge) : une version universitaire de recherches et d'applications limitées, utilisée par University of Newcastle-upon-Tyne (GB), et un progiciel véritable commercialisé par DHI sous le nom de MIKE-SHE dont le « cœur » comprend les modules suivants: fonte des neiges, interception-évapotranspiration par la couverture végétale, écoulement de surface traitant à la fois le ruissellement sur la surface et l'écoulement dans le réseau de cours d'eau par une approximation de l'onde diffusive, écoulement vertical dans la zone non saturée, écoulement quasi tridimensionnel dans la zone saturée (nappe) fondé sur la résolution numérique de l'équation non linéaire de Boussinesq, échanges entre nappe et réseau de cours d'eau tenant compte des variations spatiales d'imperméabilité du lit des rivières, convection-dispersion, simulant le transport, diffusion et dispersion des solutés conservatifs provenant de sources diffuses ou ponctuelles.

Tous les modules simulent des phénomènes non stationnaires, c'est-à-dire qu'ils reproduisent l'évolution des variables (niveaux, débits, pressions, concentrations...) dans le temps. Les équations sont fondées sur les lois de conservation (de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie) exprimées en général sous forme d'équations différentielles partielles non linéaires. Leur résolution numérique se fait à l'aide de la méthode des différences finies.

Pratiquement, un bassin versant à simuler est discrétisé en un réseau (maillage) horizontal de points de calcul, identique pour les modules de surface et pour la zone saturée (nappe). Les colonnes de sol non saturé, discrétisées à leur tour par un maillage vertical, lient les deux réseaux horizontaux. Les cours d'eau suivent conceptuellement les lignes de maillage sur la surface. La structure du modèle composé des modules de mouvement de l'eau est reproduite sur la figure 1.2.

Les applications typiques de MIKE-SHE sont: planification de l'aménagement de bassins hydrographiques; aide à la gestion et à l'exploitation des ressources en eau d'un bassin; irrigation, drainage et assainissement agricoles; études des pollutions agricoles et industrielles ; études d'impact des aménagements sur l'environnement. Les résultats fournis par le progiciel consistent en images instantanées en fonction des coordonnées spatiales ou en séries temporelles aux nœuds de maillages de toutes les variables dépendantes (teneur en eau, pressions, profondeurs, vitesses, débits, concentrations...). Une série des images typiques dont dispose l'utilisateur pour extraire les informations à l'aide du progiciel est montrée sur la figure (1.2).

Cependant, ces modèles physiques dont les avantages théoriques sur des modèles plus simples, sont en pratique loin d'être vérifiés, voire inexistantes (Perrin, 2000). Du fait de la complexité des équations, chaque maille dépend d'une grande quantité de paramètres, dont la mesure est, économiquement et techniquement, souvent impossible à l'échelle de discrétisation.

L'utilisation de cette catégorie de modèles à l'échelle d'un bassin se heurte à des contraintes limitant sérieusement leurs avantages de principe (Beven, 1985,1989) : il s'agit de modèles complexes à élaborer et lourds à exploiter, nécessitant des temps de calcul encore très importants, et faisant appel à un grand nombre de données ; ce qui fait réserver leur emploi à des objectifs de recherche. De plus, complexité du modèle n'est pas garantie de précision des résultats (Ambroise, 1999).

Cette présentation des différents types de modèles nous a permis de mieux souligner les différences de point de vue dans les démarches de modélisation, et la façon dont se traduit cette différence dans la formalisation du modèle. Pour évaluer l'intérêt de ces approches variées, il faut d'abord définir les qualités recherchées pour ces modèles. Lindström et al. (1997) présentent les qualités suivantes comme règles de modélisation:

- Le modèle doit avoir des fondements scientifiques sains,
- Les besoins en données doivent être en accord avec la disponibilité de celles-ci sur la majorité des bassins
- La complexité du modèle doit être justifiée en termes de performances,
- Le modèle doit être convenablement validé,
- Le modèle doit être compréhensible par les utilisateurs.

On peut ajouter à cela que le modèle doit apporter des réponses satisfaisantes aux questions posées et doit présenter des qualités de généralité et de robustesse. Si certaines de ces qualités sont plutôt qualitatives, d'autres en revanche peuvent être mesurées quantitativement et objectivement (Perrin, 2000).

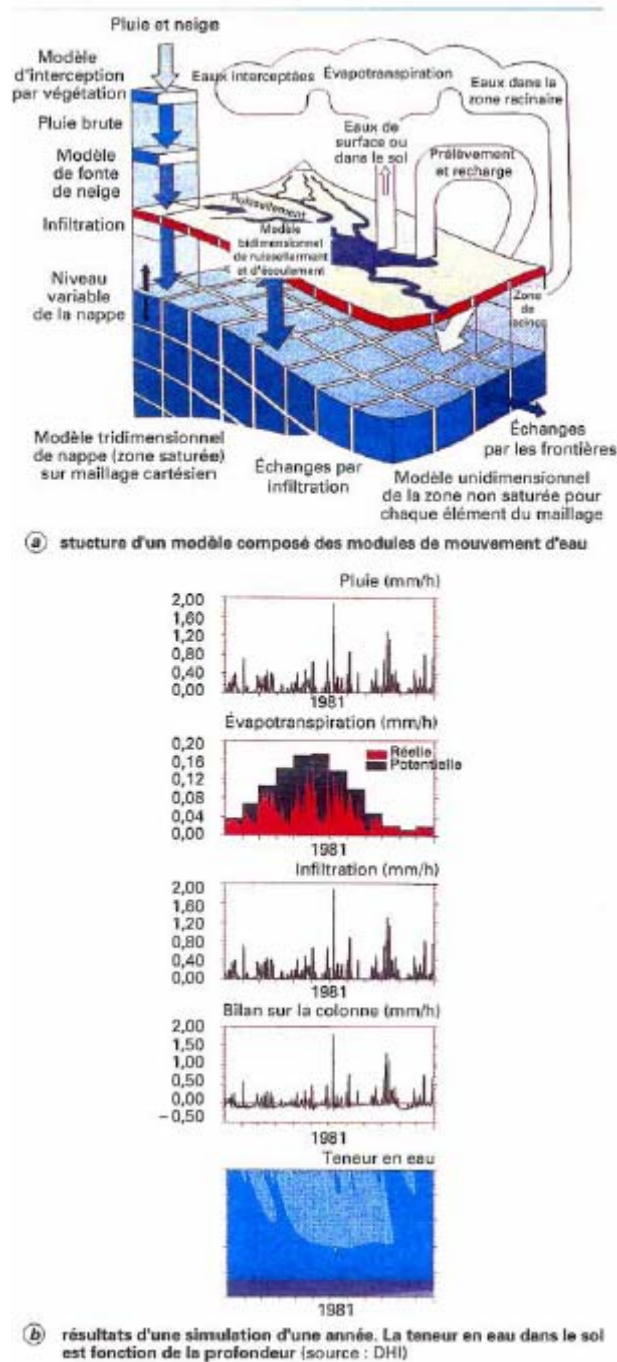


Figure 1.2: Code MIKE-SHE

### 1.8. Mise en œuvre des modèles

La mise en œuvre des modèles de simulation implique un certain nombre de phases, conduisant à un modèle opérationnel capable de simuler le système réel. Il s'agit de la construction, la détermination des paramètres internes, le calage, le test et l'exploitation du modèle;

- **La construction** : qui consiste à schématiser le système réel par le biais d'une série d'hypothèses simplificatrices et à en donner une formulation symbolique.
- **La détermination des paramètres internes** : celle-ci pose un problème ardu à cause de la complexité des mesures in situ.
- **Le calage du modèle** : permet de déterminer les paramètres d'ajustement (paramètres internes qui n'ont pas de sens physique direct) à partir d'un jeu de données et de réponses mesurées sur le système réel.
- **Le test du modèle** : est une opération indispensable qui consiste à vérifier l'aptitude du modèle calé à simuler la réalité et cela sur un jeu de données et de réponses mesurées sur le système réel, différent du jeu de données de calage.
- **Exploitation du modèle** : est la phase opérationnelle du processus pour son utilisation pratique. Dans le cas de la prévision des crues, l'exploitation du modèle étudié consiste en l'extension d'une série de débits à partir de la pluviométrie enregistrée sur le bassin versant.

### **1.9. Choix et usage**

Le choix du type de modèle dépend de l'objectif et des moyens disponibles, et passe par l'analyse et la comparaison de leurs domaines de validité et d'application. En pratique, un critère de choix important est leur coût total de mise en œuvre (temps de calcul et ressources informatiques, temps et coût d'acquisition et de mise en forme des données, temps d'interprétation), augmentant vite avec leur degré de sophistication.

Un modèle simple donne souvent de meilleurs résultats qu'un modèle complexe, mais pour un nombre beaucoup plus limité de variables et de conditions (Ambroise, 1999). Néanmoins, mieux un modèle intègre la physique des phénomènes, plus le cadre conceptuel qu'il fournit est évolutif, permettant d'intégrer toute nouvelle connaissance. De plus en plus le véritable choix se pose entre des modèles physiques très détaillés, plus « universels » mais moins optimisés, et plutôt probablement des modèles plus simplifiés mais spécialisés (en fonction d'un processus, facteur ou objectif dominant).

Enfin, la modélisation hydrologique est encore trop souvent freinée par une disponibilité insuffisante d'interfaces informatiques permettant une modélisation plus aisée et interactive facilitant la manipulation des données, la discrétisation du bassin, la représentation graphique et cartographique des données et résultats, et donc aussi la validation visuelle des simulations.

## 1.10. Conclusion

Nous avons présenté dans ce premier chapitre le contexte général de notre recherche. La modélisation du cycle de l'eau qui est à l'amont de la modélisation pluie-débit à l'échelle du bassin versant, dont la compréhension et la représentation de la transformation de la pluie en débit. Les modèles hydrologiques développés sont très variés, faisant appel à différentes perceptions du monde réel et répondant à différents objectifs.

L'identification de trois grandes catégories de modèles pluie-débit, à savoir les modèles 'boîte noire', les modèles 'à réservoirs' et ceux fondés sur la physique, ainsi que les avantages et limitations de chaque catégorie, nous a permis de conclure que les modèles conceptuels ou empiriques 'à réservoirs' semblent les plus en mesure de faire avancer la compréhension des systèmes réels (les bassins versants). Ceci dit, les modèles conceptuels globaux nous apparaissent comme étant les plus en adéquation avec le niveau actuel de compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin, ce qui leur confère une bonne crédibilité dans un contexte d'hydrologie appliquée.

En effet les équations de la physique ne semblent pas être le moyen le plus adapté de comprendre le comportement et la dynamique du bassin versant, du fait de la complexité des phénomènes y intervenant, ce qui nous rend incapable de décrire le bassin de façon fine.

Nous nous proposons donc dans notre travail de présenter les différents modèles conceptuels 'à réservoirs' existant dans la bibliographie, parmi lesquels un modèle sera choisi afin de faire le calage et la validation de celui-ci sur les données hydrométéorologiques dont nous disposons sur les bassins versants de la Soummam et de l'Isser.

Par la suite notamment au chapitre cinq, nous allons utiliser les informations contenues dans les descripteurs des bassins étudiés dans le but d'expliquer les paramètres de calage du modèle pluie-débit.

## Chapitre 2

### Aperçu bibliographique des modèles conceptuels et choix du modèle

#### 2.1 Introduction

Les modèles conceptuels globaux ‘à réservoirs’ sont les modèles les plus utilisés en modélisation pluie-débit, voire en hydrologie appliquée du fait de leur simplicité et de leur exigence minimale en données. Ces modèles se contentent généralement de séries de pluie et d'évapotranspiration potentielle (ETP) en entrée, et de séries concomitantes de débits pour le calage et l'évaluation du modèle.

Cependant le calage et la validation de ces modèles reposent principalement sur le nombre de paramètres à optimiser, ce qui signifie qu'une large incertitude pèse sur leur détermination, notamment lorsque le modèle est sur-paramétré (Gupta et Sorooshian, 1983). Par conséquent on se retrouve face à de gros problèmes d'identification au cours de la procédure de calage.

Lors de notre recherche bibliographique, nous nous sommes imposés de ne pas retenir les modèles mensuels dépassant quatre paramètres libres. Nous avons fondé ce choix sur les raisons suivantes (Mouelhi, 2003) :

- Les données étant assez entachées d'erreurs, on ne peut pas espérer s'en servir pour départager des versions trop sophistiquées.
- Si on veut espérer utiliser ultérieurement le modèle sur des bassins non jaugés, il faut au préalable établir des estimations a priori des paramètres, et l'on a jugé une telle opération condamnée à l'avance dans le cas d'une

certaine redondance parmi les paramètres, redondance qui pourrait être perceptible à partir de trois paramètres, et devenir gênante au-delà.

- Les travaux de Perrin (2000), ont montré que pour le pas de temps journalier, quatre paramètres sont suffisants pour un modèle conceptuel global. Nous ne pourrions donc pas nous permettre un nombre de paramètres plus élevé pour une échelle de temps trente fois plus grossière.

## 2.2. Quelques Modèles conceptuels au pas de temps mensuel

Dans la bibliographie, les modèles pluie-débit conceptuels globaux ne sont pas très nombreux au pas de temps mensuel. Certains ont été mis au point pour une application particulière (Schaake et Chunzen, 1989) et (McCabe et Ayers, 1898 in Mouelhi, 2003).

### 2.2.1. Modèle ABCD (Thomas, 1981)

Ce modèle, à quatre paramètres, s'articule autour de deux réservoirs : un réservoir sol de capacité maximale  $A$  et un réservoir linéaire de vidange caractérisé par le paramètre  $D$ . La transformation pluie-débit s'effectue en deux phases :

**Fonction de production:** La pluie nette ( $PN$ ) destinée à l'écoulement se déduit comme suit : Pour le mois ( $i$ ) et sous l'effet de la pluie ( $P$ ), le stock du réservoir prend la valeur de  $S_i^1$

$$S_i^1 = S_{i-1} + P \quad \text{Eq. (2.1)}$$

L'évapotranspiration réelle  $ER$ , dépend du stock  $S_i^1$  et donnée par :

$$ER = S_i^1 \left( 1 - \exp\left(-\frac{E}{A}\right) \right) \quad \text{Eq. (2.2)}$$

Après l'effet de la pluie et de l'évaporation le stock prendra la forme :

$$S_i = S_i^1 - ER = (S_{i-1} + P) \exp\left(-\frac{E}{A}\right) \quad \text{Eq. (2.3)}$$

La pluie nette pour le mois  $i$  est calculée par la relation suivante:

$$PN_i = \frac{(1-B)\frac{S_i^2}{A}}{1 + (1-2B)\frac{S_i}{A} + \sqrt{\left(1 + \frac{S_i}{A}\right)^2 - 4\frac{BS_i}{A}}} \quad \text{Eq. (2.4)}$$



Où,  $B$  est un paramètre à caler compris entre 0 et 1.

**Fonction de transfert :** La pluie nette est subdivisée en deux fractions selon le troisième paramètre  $C$ , la première se traduit en écoulement direct :

$$Qd = (1 - C) PN_i \quad \text{Eq. (2.5)}$$

La fraction complémentaire à  $Qd$ , est destinée pour alimenter le réservoir de routage :

$$R_i = R_{i-1} + CP_i \quad \text{Eq. (2.6)}$$

Le débit délivré par le réservoir linéaire de routage (de paramètre  $D$ ) est donné par:

$$Qr = DR_i \quad \text{Eq. (2.7)}$$

Le débit total pour le mois ( $i$ ) sera alors:

$$Q = Qd + Qr \quad \text{Eq. (2.8)}$$

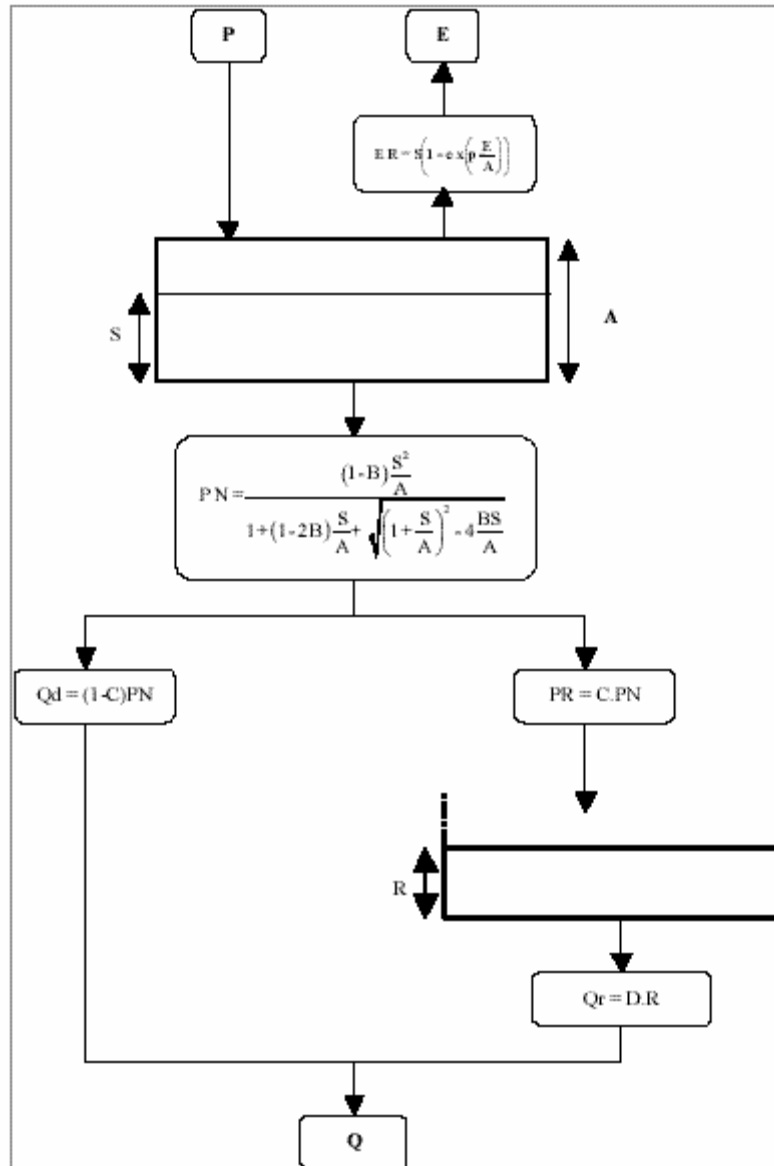


Figure 2.1: Architecture du Modèle ABCD (Thomas, 1981)

### 2.2.2. Modèle de Vandewiele et al. (1991)

Ce modèle correspond à une des variantes proposées par Vandewiele et al. (1991). Il a été appliqué sur un échantillon de 79 bassins : 65 bassins du nord de la Belgique, six bassins des Ardennes, six autres bassins du Sud de la Chine et deux bassins de Birmanie. Il s'agit d'un modèle à trois paramètres avec un seul réservoir qui assure à la fois la régulation de la production et le routage. Au cours du mois  $i$ , le sol subit l'effet de l'évaporation  $ES$  donné par la relation :

$$\begin{cases} ES = E \left( 1 - A \frac{P+S_{i-1}}{E} \right) \\ S_i^l = S_{i-1} - ES \end{cases} \quad \text{Eq. (2.9)}$$

où,  $A$  est le premier paramètre du modèle ; compris entre 0 et 1.

Le réservoir se vidange selon une loi quadratique et relâche un débit  $Q_s$  en fonction du niveau  $S_i^t$  du réservoir en introduisant un deuxième paramètre  $B$ .

$$Q_s = \frac{S^2}{B + S} \quad \text{Eq. (2.10)}$$

La pluie  $P$  donne lieu à un écoulement direct  $Q_d$  dépendant d'un troisième paramètre  $C$ , après une interception partielle par l'ETP qui le réduit au niveau  $PN$ :

$$\begin{cases} Z = E \left( 1 - \exp\left(-\frac{P}{E}\right) \right) \\ PN = P - Z \\ Q_d = C \cdot S_i^t \cdot PN \end{cases} \quad \text{Eq. (2.11)}$$

L'écoulement mensuel  $Q$  à l'exutoire du bassin est la somme des deux écoulements:

$$Q = Q_s + Q_d \quad \text{Eq. (2.12)}$$

Après relâchement de l'écoulement  $Q$ , le niveau du stock du réservoir devient  $S_i$  donné par l'équation de bilan :

$$S_i = S_i^t + P - Q \quad \text{Eq. (2.13)}$$

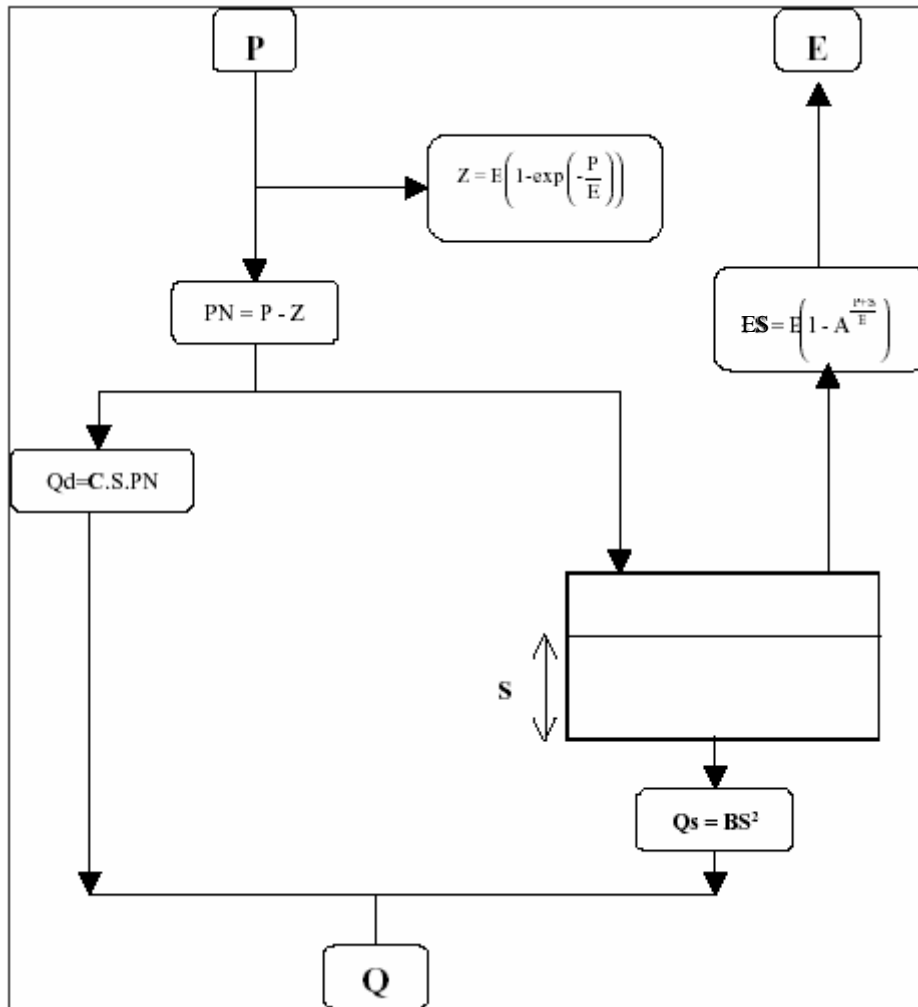


Figure 2.2 : Architecture du modèle de Vandewiele et al. (1991)

### 2.2.3. Modèle de Gardner (Bhaskar, 1999)

Le modèle de Gardner est un modèle conceptuel pluie-débit basé sur la formule d'évaporation d'Ol'dekop datant de 1911 (Bhaskar, 1999). Il s'agit d'un modèle à 2 paramètres avec un seul réservoir. Ce réservoir dont le contenu en eau est  $R$  reçoit la pluie mensuelle  $P$  et est soumis à l'évapotranspiration potentielle  $E$ . L'évapotranspiration  $E$  est ajustée avec un paramètre  $B$  afin de donner :

$$E1 = E \cdot B \quad \text{Eq. (2.14)}$$

L'évapotranspiration réelle  $ER$  prélevée sur la pluie est donnée par l'équation ci-dessous

$$\begin{cases} ER = E1 \cdot \tanh\left(\frac{P}{E1}\right) \\ PR = P - ER \end{cases} \quad \text{Eq. (2.15)}$$

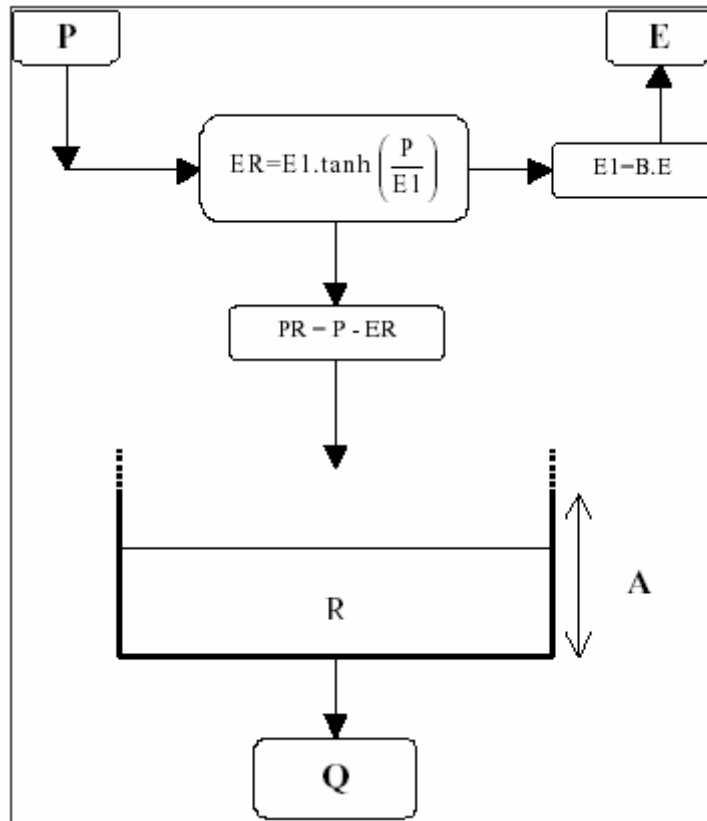


Figure 2.3 : Architecture du modèle de Gardner (Bhaskar, 1999)

D'où :

$$R = R_{i-1} + PR \quad \text{Eq. (2.16)}$$

Le principe de vidange du réservoir dans ce modèle est le même que pour le modèle GR2M (présenté ci-dessous), avec deux cas particuliers de vidange (linéaire ou quadratique) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Cas linéaire : } Q = AR \\ \text{Cas quadratique : } R_i = \frac{R}{1 + \frac{R}{A}} \\ Q = R - R_i \end{array} \right. \quad \text{Eq. (2.17)}$$

Avec  $Q$  le flux total d'écoulement et  $A$  le paramètre du réservoir de stockage.

### 2.2.4. Modèle de Guo (2002)

Guo et al. (2002) ont proposé un modèle pluie-débit au pas de temps mensuel à deux paramètres. Il a été testé et validé sur 100 bassins chinois de petite et moyenne taille. Il a été utilisé pour prédire les impacts des changements climatiques en Chine.

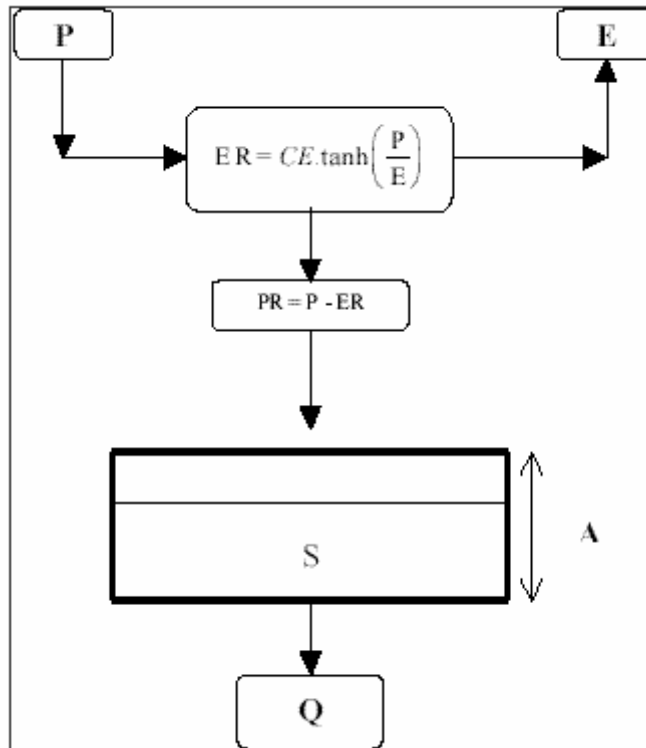


Figure 2.4 : Architecture du modèle de Guo (2002)

Il s'agit d'un modèle conceptuel pluie-débit basé sur la formule d'évaporation d'Ol'dekop datant de 1911 (Bhaskar, 1999) comme pour le cas du modèle de Gardner avec 2 paramètres (A et C) et un seul réservoir. Ce réservoir dont le contenu en eau est  $S$  reçoit la pluie mensuelle  $P$  et est soumis à l'évapotranspiration potentielle  $E$ . L'évapotranspiration réelle  $ER$  prélevée sur la pluie est donnée par l'équation ci-dessous :

$$\begin{cases} ER = C.E.\tanh\left(\frac{P}{E}\right) \\ PR = P - ER \end{cases} \quad \text{Eq. (2.18)}$$

Avec, C le premier paramètre du modèle. Le stock S sera alors déduit comme suit :

$$S = S_{i1} + PR \quad \text{Eq. (2.19)}$$

Le débit  $Q$  est donné par :

$$Q = S \tanh\left(\frac{S}{A}\right) \quad \text{Eq. (2.20)}$$

En fait, Guo propose une vidange du réservoir à la fois linéaire et quadratique. Quadratique quand  $S$  est faible :

$$Q \cong \frac{S^2}{A} \quad \text{Eq. (2.21)}$$

et linéaire quand  $S$  tend vers  $A$  :

$$Q \cong S \quad \text{Eq. (2.22)}$$

## 2.2.5. Modèles 'Cemagref Antony' ou 'GR'

### 2.2.5.1. Historique des modèles hydrologiques 'GR'

L'idée de la modélisation 'GR' a été lancée par C. Michel en 1983 après l'analyse d'un modèle conceptuel CREC (Cormary et Guilbot, 1973) à neuf paramètres sur le bassin expérimental de l'Orgeval. Il a été constaté que ce modèle présentait des difficultés au niveau de la mise en œuvre et du calage. L'idée s'est développée alors, en partant du modèle le plus élémentaire possible (un unique paramètre lié à un unique réservoir) et en ne compliquant cette architecture que pour faire face aux difficultés à reproduire les débits réels et non pour satisfaire des conceptions a priori sur le cycle hydrologique. Cette démarche a débouché sur un modèle simple à deux paramètres GR2J (Michel, 1983).

Utilisé par Loumagne (1988) et Devred (1989), ce modèle a ensuite été repris par Edijatno (1987, 1991) qui a, par une démarche résolument empirique, amélioré sa structure en modifiant notamment la fonction de production et en ajoutant un troisième paramètre, constante de temps d'un hydrogramme unitaire. Le nouveau modèle journalier GR3 (Edijatno et Michel, 1989) fut testé sur un échantillon de 110 bassins versants français et donna des résultats satisfaisants en comparaison avec quelques modèles plus complexes.

Dans une perspective de constante amélioration de cette structure, Nascimento (1991, 1995) a isolé des bassins intermittents pour lesquels le modèle avait du mal à fournir des résultats corrects, et a introduit dans le modèle un quatrième paramètre gouvernant des échanges 'souterrains' pour répondre aux exigences de bonne reproduction des débits. Le nouveau modèle GR4 a fourni sur un échantillon de 120 bassins de meilleures performances que la version antérieure à trois paramètres.

Parallèlement aux travaux de Nascimento (1995), Makhoulf (1994) a mené des recherches sur l'explication des paramètres du modèle GR4J sur des bassins de Moselle et de Bretagne. Il a également donné quelques voies pour le traitement de la neige sur les bassins de la Moselle et travaillé sur un modèle mensuel à deux paramètres GR2M (Makhoulf et Michel, 1994). Auparavant, Kabouya (1990) avait également mis au point un modèle mensuel GR3M, à trois paramètres, pour l'évaluation de la ressource en eau en Algérie septentrionale (Kabouya et Michel, 1991).

Plus récemment, Edijatno *et al.* (1999) ont proposé une nouvelle version à trois paramètres du modèle journalier. Cette version, dans laquelle la capacité du réservoir de production est fixe, est très similaire à la version proposée par Nascimento (1995) avec des fonctions de production et d'échange légèrement modifiées. Enfin, Perrin (2000) a rajouté un quatrième paramètre au modèle journalier à la suite d'un travail comparatif avec d'autres modèles (Perrin *et al.* 2000). Un autre volet de la recherche sur la modélisation pluie-débit porte sur le problème plus spécifique de la prévision de crue. Yang (1993), utilisant le modèle GR3 d'Edijatno (1991) au pas de temps horaire, a mis au point une méthode de prévision des crues avec mise à jour des paramètres du modèle.

Parallèlement aux travaux réalisés au Cemagref d'Antony, l'équipe du Cemagref d'Aix-en-Provence s'est intéressée à la prévision des crues et a couplé un générateur stochastique de pluies (Cernesson *et al.*, 1996) à une version horaire de GR3 au sein du modèle SHYPRE (Cernesson et Lavabre, 1994). Des travaux ont également été menés sur le modèle mensuel (Lavabre *et al.*, 1993; Makhoulf *et al.*, 1995) qui est à la base du logiciel LOIEAU pour l'estimation de variables réglementaires sur les débits (Lavabre *et al.*, 1997).

Parmi les travaux ayant appliqué ces modèles GR, on peut citer ceux réalisés par l'IRD (ex-ORSTOM) en Afrique. Servat et Dezetter (1991, 1992) ont appliqué le modèle GR3 d'Edijatno sur des bassins de Côte-d'Ivoire en les comparant aux modèles CREC et MODGLO. Paturel *et al.* (1995), Ouedraogo *et al.* (1998) ont testé le modèle mensuel également sur des bassins ivoiriens.

Le modèle GR3 a également été utilisé par Yang *et al.* (1991) dans le cas de la gestion d'un réservoir. Yang et Parent (1996) ont par ailleurs testé une méthode d'analyse de fiabilité sur le modèle GR3 et Kuczera et Parent (1998) ont appliqué une procédure 'Chaîne de Markov' Monte-Carlo pour l'estimation de l'incertitude sur les paramètres du modèle GR4. Un schéma récapitulatif est donné dans la figure (2.5).



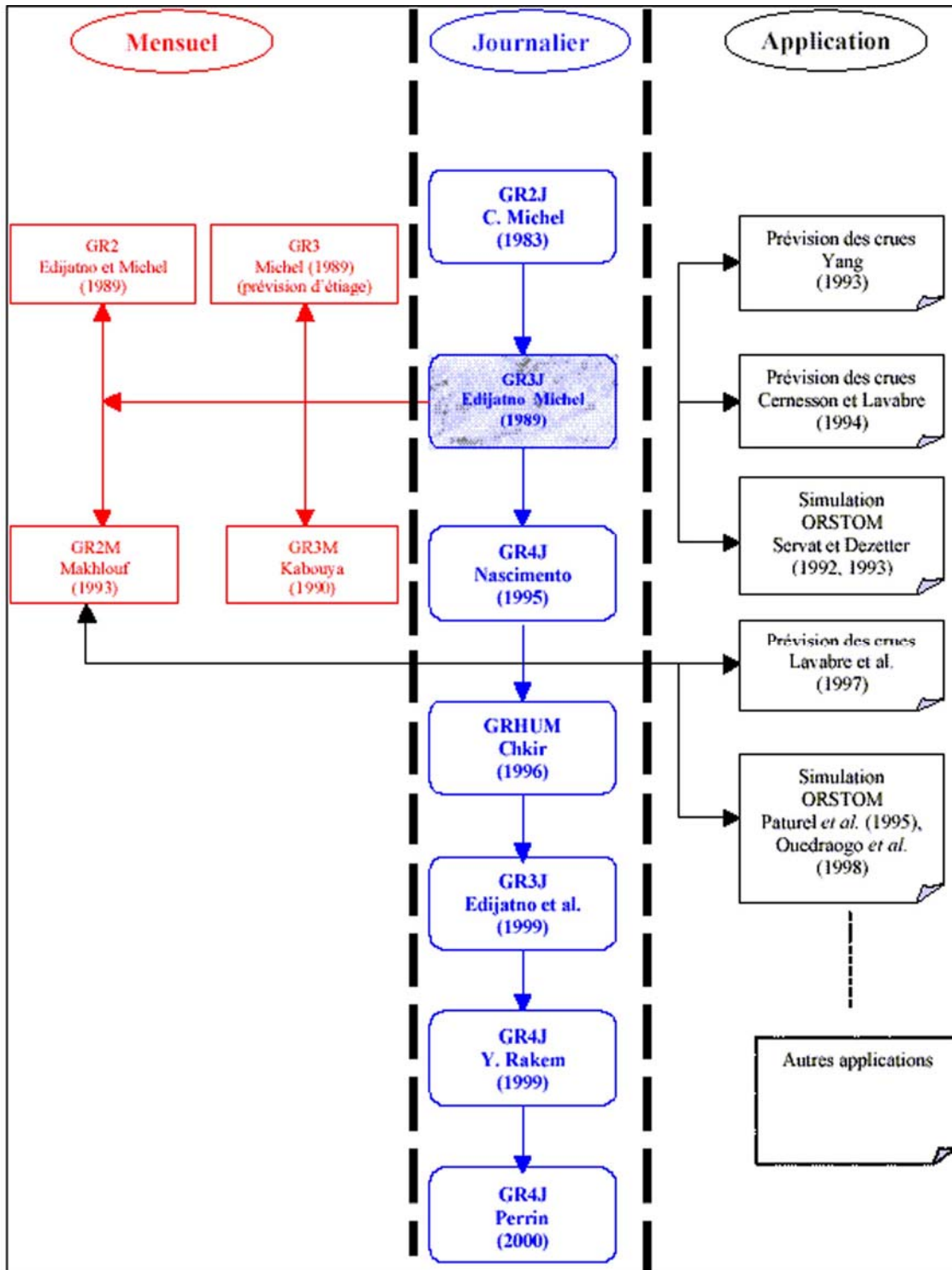


Figure 2.5 : Evolution des travaux des modèles 'GR' (d'après Mouelhi, 2003)

### 2.2.5.2. Humidité du bassin versant et modélisation pluie-débit

Les travaux dans ce domaine ont été réalisés au Cemagref d'Antony en collaboration avec le Centre d'Etudes Terrestres et Planétaires (CETP) de Vélizy. Les bassins versants de l'Orgeval et du Naizin ont été des supports d'observation privilégiés dans le développement des modèles. Partant de la structure simple à deux paramètres proposée par Michel (1983), les recherches de Loumagne (1988) ont porté sur l'utilisation de données d'humidité du sol pour la modélisation pluie-débit.

En se basant sur des observations révélant l'importance de l'état hydrique superficiel du bassin dans la production des débits, le but de ce travail était de substituer au réservoir de production les données d'humidité. Cette approche a fourni des résultats prometteurs et elle a donc été approfondie, tout d'abord par Chkir (1996), qui a proposé le modèle GRHUM issu de la modification du modèle GR4: le réservoir de production a été modifié pour obtenir un réservoir bicouche avec utilisation du schéma de Deardoff, la couche supérieure étant destinée à pouvoir simuler l'état d'humidité de surface du bassin versant. Ce modèle peut être utilisé soit en simulation, soit en assimilation avec utilisation de données de terrain par le modèle.

Cette méthodologie a été ensuite reprise par Cognard-Plancq (1996) en collaboration avec le CETP avec l'utilisation de données de télédétection qui, après traitement, permettent d'obtenir un indice global d'humidité du bassin pouvant être utilisé par le modèle (Loumagne *et al.*, 1996).

Ces travaux ont été poursuivis (Quesney, 1999), notamment avec l'utilisation du modèle GRHUM dans un cadre de la prévision de crue et des méthodes d'assimilation des données telles que la méthode développée par Yang (1993). Le projet européen AIMWATER, (1998 – 2001) au Cemagref d'Antony, s'inscrit également dans cette démarche (Loumagne *et al.* 2001). Récemment, Andréassian (2002) a appliqué le modèle GR4J dans le cadre de la mise au point de tests de mise en évidence d'impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants.

### 2.2.5.3. Architecture des modèles 'GR'

Nous retenons les modèles mensuels GR2, GR3, GR3M et GR2M. L'écriture mathématique de la transformation pluie-débit de ces modèles est semblable. Nous présentons donc seulement les équations relatives aux différentes phases du modèle GR2M (Makhlouf, 1994). Les autres s'obtiennent en remplaçant des termes qui seront signalés dans chaque modèle.

#### A. Modèle GR2 (Edijatno et Michel, 1989)

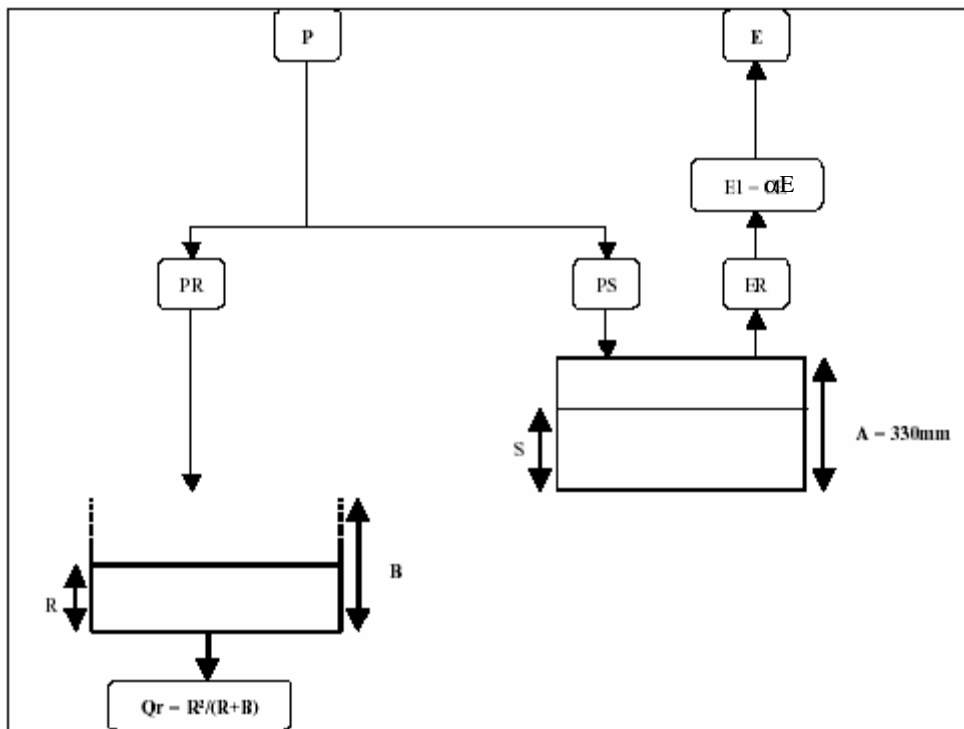


Figure 2.6 : Architecture du modèle GR2 (Edijatno et Michel, 1989)

Le modèle GR2 a été inspiré du modèle pluie-débit journalier GR3J (Edijatno et Michel, 1989). Il est composé de deux réservoirs, dont les stockages sont notés  $R$  et  $S$ . Au cours de la transformation pluie-débit, on assiste, selon le modèle, aux phases suivantes :

- Un 'ajustement' partiel des entrées se traduisant par une 'correction' de l'évapotranspiration par le paramètre libre  $\alpha$
- Pas de phase d' 'interception'
- Pas d'écoulement pseudo-direct.

Il s'agit alors d'un modèle à deux réservoirs. Un réservoir 'Sol' caractérisé par sa capacité maximale  $A$  fixée à **330 mm** et un réservoir quadratique de routage caractérisé par son paramètre  $B$ . Le troisième paramètre  $\alpha$ , est introduit pour 'corriger' l'évapotranspiration  $E$  pour prendre la valeur  $E_1 = \alpha E$

## B. Modèle de prévision d'étiage GR3 (Michel, 1989)

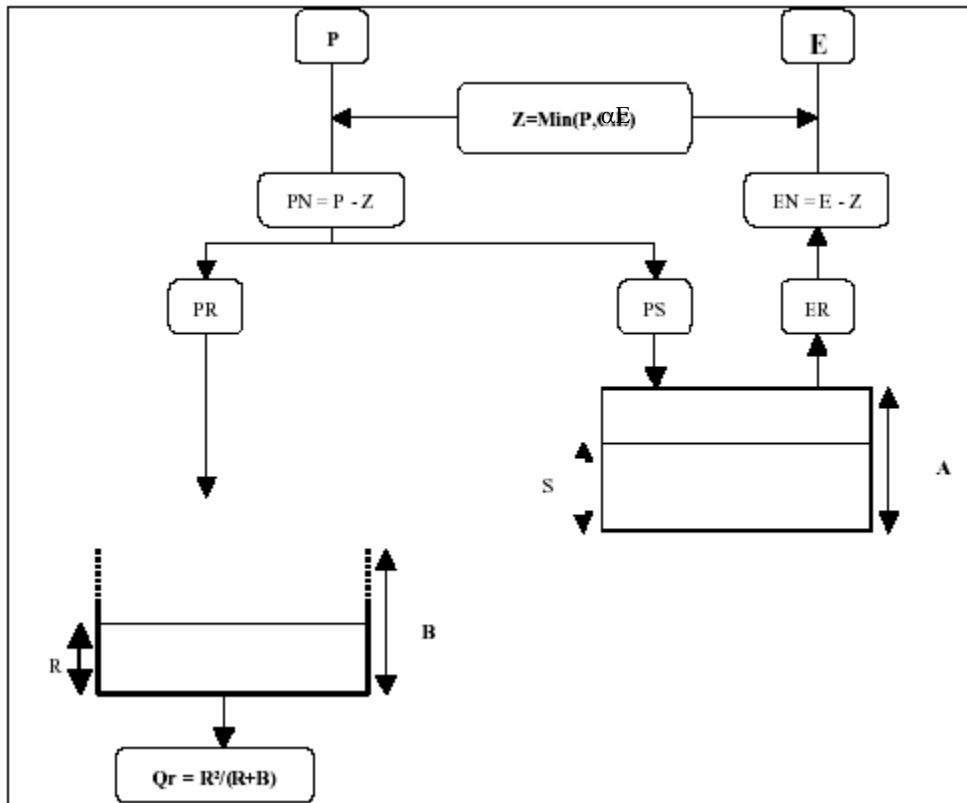


Figure 2.7 : Architecture du modèle de prévision d'étiage GR3 (Michel, 1989)

Ce modèle a été mis au point par C. Michel à l'occasion de la sécheresse de 1989. Il a été inspiré par les travaux d'Edijatno (1989). Il est très proche de GR2 (Edijatno et Michel, 1989). Les différences sont :

- Une nouvelle phase d'interception présentée par la fonction 'Z' qui modifie l'impact de l'évapotranspiration.
- Le paramètre A est un paramètre libre, contrairement à GR2 où il a été fixé à 330mm.

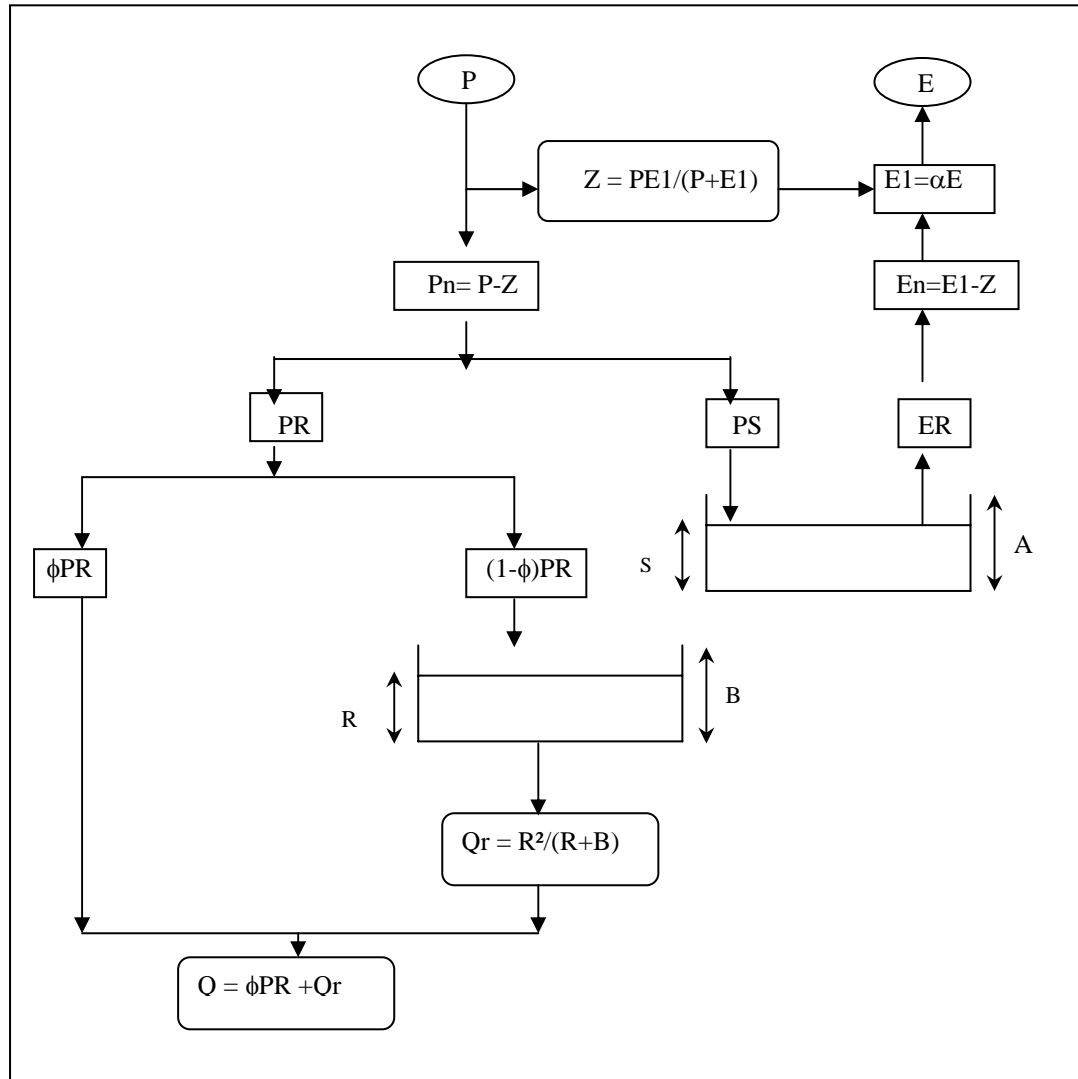
Il s'agit d'un modèle à deux réservoirs. Un réservoir 'Sol' caractérisé par le paramètre **A** qui représente sa capacité maximale et un réservoir quadratique de routage caractérisé par le paramètre libre **B**. Le troisième paramètre  $\alpha$  est introduit dans la neutralisation de la manière suivante :

$$Z = \text{Min}(P, \alpha E) \quad \text{Eq. (2.23)}$$

Ce qui donne :

$$\begin{cases} PN = P - Z \\ EN = E - Z \end{cases} \quad \text{Eq. (2.24)}$$

### C. Modèle GR3M



**Figure 2.8 : Architecture du modèle GR3M issu des travaux Kabouya-Makhlouf-Michel**

Suite aux travaux de Kabouya (1990, 1991) et de Makhlouf (1994), une variante à trois paramètres GR3M a été proposée. Ce modèle est très proche des modèles GR2 et GR3 présentés ci-dessus. Il est caractérisé par :

- Une phase partielle ‘d’ajustement’ des données qui se traduit par un paramètre lié seulement à l’évapotranspiration. Contrairement au modèle GR2 (Michel et Edijatno, 1989) où le paramètre concerne la pluie et l’évaporation et au modèle GR3 de prévision d’étiage (Michel, 1989) où cette phase ne figure pas.
- Une nouvelle forme d’interception **Z**

- Contrairement au modèle de prévision d'étiage GR3 (Michel, 1989), le modèle de Kabouya présente un écoulement pseudo-direct caractérisé par son coefficient noté ;  $\phi = 0,5$ .

Comme pour le modèle de prévision d'étiage GR3 (Michel, 1989), il s'agit d'un modèle à deux réservoirs. Un réservoir 'Sol' caractérisé par le paramètre  $A$  qui représente sa capacité maximale et un réservoir quadratique de routage caractérisé par le paramètre  $B$ . En revanche, le troisième paramètre  $\alpha$  est introduit plutôt pour 'corriger' l'évapotranspiration  $E$ , et non pas au niveau de l'interception comme pour le cas de GR3 (Michel, 1989), de la manière suivante :

$$E_1 = \alpha E \quad \text{Eq. (2.25)}$$

$$Z = \frac{PE_1}{P + E_1} \quad \text{Eq. (2.26)}$$

#### D. Modèle GR2M (Makhlouf, 1994)

Le modèle **GR2M** (Makhlouf et Michel, 1994) est à cette date le modèle pluie-débit retenu au pas de temps mensuel. Il a été largement repris pour dresser la cartographie des débits moyens mensuels du sud de la France.

#### Ajustement des entrées

$P$  et  $E$  sont ajustées par le même paramètre multiplicatif  $X_1$  afin de donner  $P_1$  et  $E_1$ . Ce paramètre agit comme un coefficient correcteur des entrées.

$$P_1 = X_1 P \quad \text{Eq. (2.27)}$$

$$E_1 = X_1 E \quad \text{Eq. (2.28)}$$

**Interception ;** Elle se traduit par une quantité ( $Z$ ) qui permet de calculer les quantités de pluie et d'évapotranspiration nettes participant effectivement à l'écoulement :

$$Z = \frac{P_1 E_1}{(P_1^\gamma + E_1^\gamma)^{\frac{1}{\gamma}}} \quad \text{Eq. (2.29)}$$

où,  $\gamma = 0.4$

Cette quantité est soustraite aux entrées :

$$\begin{cases} PN = P1 - Z \\ EN = E1 - Z \end{cases} \quad \text{Eq. (2.30)}$$

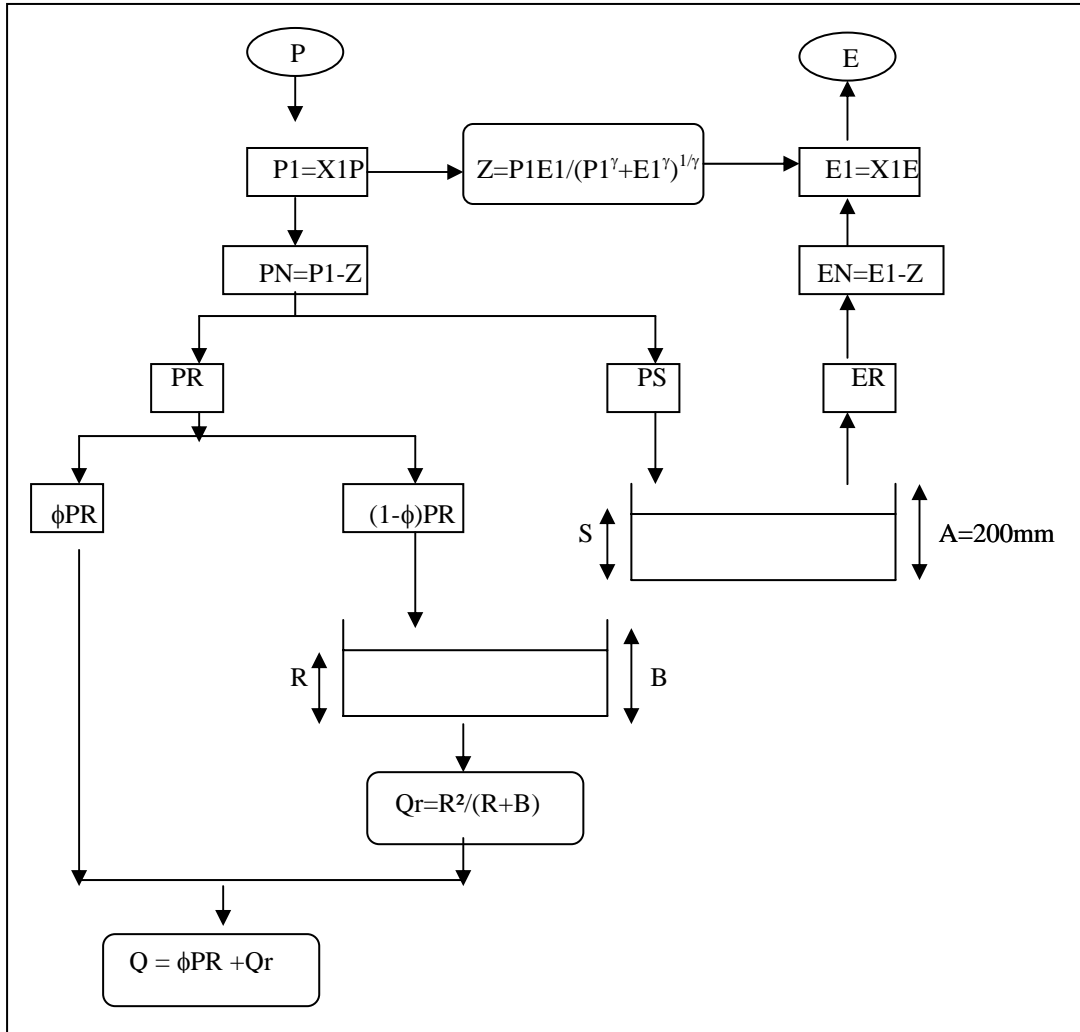


Figure 2.9 : Architecture du modèle GR2M (Makhlouf, 1994)

**Effet du réservoir Sol (Stockage ou effet de mémoire) ;** En raison des excitations de forçage **PN** et **EN**, la valeur du stock d'humidité du réservoir sol, avec la valeur initiale ***Si-1***, au début du mois, prendra successivement différentes valeurs. D'abord du fait de **PN**, le niveau de ***Si-1*** devient ***S1*** :

$$S1 = \frac{S_{i-1} + AW}{1 + W \frac{S_{i-1}}{A}} \quad \text{Eq. (2.31)}$$

avec,

$$W = \tanh\left(\frac{PN}{A}\right) \quad \text{Eq. (2.32)}$$

A : un paramètre fixe = 200 mm correspondant à la capacité maximum du réservoir sol.

La valeur d'excès de précipitation PR est déterminée dans cette étape :

$$PR = PN + S_{i-1} - S1 \quad \text{Eq. (2.33)}$$

Puis, en raison de **EN**, **S1** devient **Si** :

$$\left\{ \begin{array}{l} S_i = \frac{S1(1-V)}{1+V\left(1-\frac{S1}{A}\right)} \\ \text{Où} \\ V = \tanh\left(\frac{EN}{A}\right) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Eq. (2.34)} \\ \\ \text{Eq. (2.35)} \end{array}$$

Ces relations ont été dérivées de l'intégration des formules instantanées beaucoup plus simples ( Edijatno et Michel, 1989) :

$$\left\{ \begin{array}{l} dS = \left[ 1 - \left( \frac{S}{A} \right)^2 \right] dPN \quad (I) \\ dPR = \left( \frac{S}{A} \right)^2 dPN \quad (II) \\ dS = - \left( \frac{S}{A} \right) \left[ 2 - \left( \frac{S}{A} \right) \right] dEN \quad (III) \end{array} \right. \quad (2.36) \quad \text{Eq.}$$

(I) représente la variation du stock (S) sous l'effet de la fraction de la pluie qui alimente le réservoir Sol. (II) représente la fraction de la pluie destinée au routage. (III) représente la variation du stock S sous l'effet de l'évapotranspiration, les deux actions, celle de PN et celle de EN étant traitées séparément.

**Routage et écoulement pseudo-direct ;** Une portion  $\phi$  de **PR** correspond à l'écoulement direct et la partie complémentaire est introduite dans un réservoir **R**, dont le niveau passe de Ri-1 à R0.

$$R_i = R_{i-1} + (1 - \phi)PR \quad \text{Eq. (2.37)}$$

$\phi$  est un paramètre fixe égal à 0,2.



Le réservoir de capacité  $B$  et de niveau  $R$  se vidange selon une loi puissance d'exposant fixe  $g$  ( $g=2$  a été proposé pour les bassins versants français).

$$\frac{1}{R_i^g} = \frac{1}{R_0^g} + \frac{1}{B^g} \quad \text{Eq. (2.38)}$$

Le volume libéré par  $R$  au cours de la vidange est donné par:

$$Q_r = R_0 - R_i \quad \text{Eq. (2.39)}$$

Le débit total est alors :

$$Q_t = \phi PR + Q_r \quad \text{Eq. (2.40)}$$

#### 2.2.5.4. Récapitulatif des modèles 'GR'

Les principales caractéristiques des modèles GR au pas de temps mensuel sont présentés dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Récapitulatif des modèles 'GR'

	Ajustement des entrées P et E	Neutralisation	Paramètre du réservoir sol A	Paramètre du routage quadratique B	Ecoulement Pseudo-direct	Echantillon de données	Nombre de paramètres
GR2M (Makhlouf, 1994)	$P1=\alpha P$ $E1=\alpha E$	$Z = \frac{P1.E1}{(P1^g + E1^g)^{\frac{1}{g}}}$	A = 200 mm	Libre	$\phi = 0.2$	91 bassins français	2
GR3M (Kabouya, 1990)	$E1=\alpha E$	$Z = PE1 / (P1 + E1)$	Libre	Libre	$\phi = 0.5$	6 bassins algériens	3
GR3 (Michel, 1989)	-	$Z = \text{Min}(P, \alpha E)$	Libre	Libre	$\phi = 0$	91 bassins français	3
GR2 (Edijatno et Michel, 1989)	$E1=\alpha E$	-	A = 330 mm	Libre	$\phi = 0$	Quelques bassins français	2

Globalement, ces quatre modèles présentent des architectures semblables qui s'articulent autour de deux réservoirs : un réservoir 'Sol' caractérisé par sa capacité maximale  $A$  et un réservoir quadratique de routage caractérisé par sa capacité  $B$ . Ce qui différencie un modèle d'un autre, c'est la modalité 'd'ajustement' des entrées, l'existence et la forme de 'l'interception', le caractère du paramètre  $A$  qui est libre ou fixe et l'existence ou non d'un écoulement pseudo-direct.

La caractéristique de ces modèles qui nous semble 'curieuse' est le traitement des entrées soit par « **Pajustement** », soit par « **l'interception** » ou les deux à la fois. 'L'interception' a pour rôle principal d'éviter l'effet brutal des entrées. En effet pour

le pas de temps mensuel, relativement large, introduire la totalité de la pluie et de l'évapotranspiration semble a priori une mesure brutale, négligeant ainsi l'effet tampon de l'interface atmosphère – bassin versant. L'interception alors joue un rôle d'amortisseur de ces effets 'brutaux'.

### 2.3. Choix du modèle

L'aspect 'complexe' d'un modèle pluie-débit conceptuel global peut-être mesuré par le nombre de paramètres laissés libres lors du calage. Un modèle est d'autant plus 'complexe' qu'il présente un nombre de paramètres plus élevé. Cependant, la performance et la fiabilité d'un modèle ne sont pas forcément liées au degré de complexité d'un modèle, c'est-à-dire qu'un modèle conceptuel complexe n'est pas nécessairement plus efficace qu'un modèle moins complexe (Mouelhi, 2002).

Notre choix a été le modèle GR2M à deux paramètres dans sa nouvelle version modifiée, conceptualisé selon le schéma ci-dessous. Notre choix est motivé par les raisons suivantes:

- la non disponibilité des données hydro-météorologiques (pluviométriques et hydrométriques) à un pas de temps inférieur à (01) un mois (données non continues), pour les bassins versants à étudier.
- ce modèle a donné de bons résultats sur les bassins versants du sud de la France, et vu que les conditions climatiques de ces bassins sont relativement proches de ceux de notre zone d'étude (bassins de la Soummam et de l'Isser), on estime que le GR2M donnera un bon calage en l'appliquant sur les données de ces bassins versants.
- Une étude des apports du nord de l'Algérie, réalisée par l'ANRH et le bureau d'études Allemand 'GTZ' dans le cadre d'un projet Algéro-Allemand « Etude des Ecoulements Moyens Annuels sur le Nord de l'Algérie » achevée en 2003, et ce en utilisant le logiciel LOIEAU basé sur le modèle mensuel à deux paramètres, a donné des résultats très satisfaisants. Ce qui nous a incité à choisir un modèle conceptuel ne dépassant pas deux paramètres de calage.

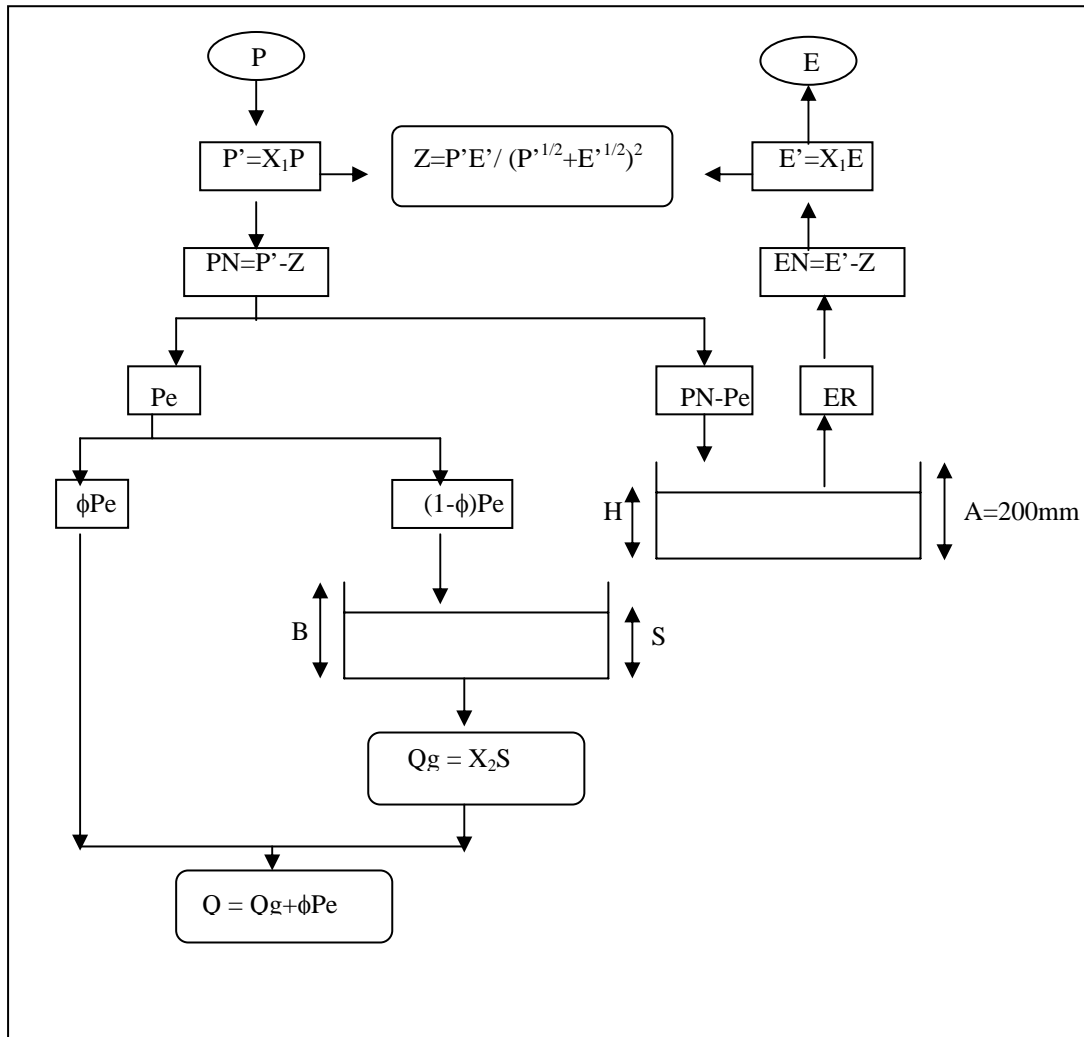


Figure 2.10 : Schéma conceptuel du modèle GR2M modifié (2002).

Le modèle GR2M est constitué d'un réservoir sol qui régit la fonction de production et est caractérisé par son remplissage maximal  $A$ , qui correspond à la capacité en eau du sol. Il comporte également un réservoir eau gravitaire qui régit la fonction de transfert. Le schéma conceptuel est présenté en figure .

Les deux entrées pluie ( $P$ ) et évapotranspiration potentielle ( $E$ ) sont modulées dans la même proportion et concomitamment en multipliant les valeurs de ces entrées par un coefficient  $X_1$  ( $0 < X_1 < 1$ ) qui est un des paramètres du modèle.

Ce paramètre agit comme un coefficient d'ajustement des entrées, supposant que les précipitations et les ETP sont des variables souvent douteuses et qu'on préfère le modèle décider de la valeur corrective à attribuer. Une quantité  $Z$  est ensuite soustraite à la pluie modulée  $P'$  et à l'évapotranspiration potentielle modulée  $E'$  du mois considéré.

$$\begin{aligned} P' &= X_1 P \\ E' &= X_1 E \end{aligned} \quad \text{Eq. (2.41)}$$

Cette quantité joue le rôle d'interception et permet de calculer les précipitations et les ETP nettes participant à l'écoulement. Au pas de temps mensuel, cette quantité sert à amortir l'effet brutal des entrées dans le modèle.

La quantité  $Z$  est de la forme :

$$Z = \frac{P'E'}{(P'^{1/2} + E'^{1/2})^2} \quad \text{Eq. (2.42)}$$

Ces opérations sur la pluie et l'évapotranspiration donnent respectivement :

$$\begin{aligned} PN &= X_1 P - Z \\ EN &= X_1 E - Z \end{aligned} \quad \text{Eq. (2.43)}$$

Soit  $\mathbf{H}$  le niveau du réservoir sol en début du pas de temps. Une partie de  $\mathbf{PN}$  augmente le niveau du réservoir, qui devient  $\mathbf{H}_1$  :

$$H_1 = \frac{H + AV}{1 + H \frac{V}{A}} \quad \text{Eq. (2.44)}$$

avec,

$$V = \tanh\left(\frac{PN}{A}\right) \quad \text{Eq. (2.45)}$$

Le complément de  $\mathbf{PN}$  est donc :

$$Pe = PN - (H_1 - H) \quad \text{Eq. (2.46)}$$

Sous l'effet de  $\mathbf{EN}$ , le niveau  $\mathbf{H}_1$  du réservoir sol devient  $\mathbf{H}_2$

$$H_2 = \frac{H_1(1 - W)}{1 + W\left(1 - \frac{H_1}{A}\right)} \quad \text{Eq. (2.47)}$$

où,

$$W = \tanh \frac{EN}{A} \quad \text{Eq. (2.48)}$$

$\mathbf{H}_2$  correspond au niveau du réservoir sol pour le pas de temps suivant.

L'évapotranspiration réelle peut être déduite par différence des niveaux du réservoir sol au début et à la fin de chaque pas de temps.

Le réservoir eau gravitaire reçoit  $(1-\phi)\mathbf{Pe}$ , tandis que  $\phi\mathbf{Pe}$  s'écoule directement.

Le niveau  $S$  du réservoir eau gravitaire au début du mois considéré augmente et devient  $S_1$

$$S_1 = S + (1 - \phi)Pe \quad \text{Eq. (2.49)}$$

Le débit délivré par ce réservoir est :

$$Q_g = X_2 S_1 \quad \text{Eq. (2.50)}$$

Avec,  $0 < X_2 < 1$ ,  $X_2$  étant le second paramètre du modèle.

Le niveau  $S_2$  du réservoir à la fin du pas de temps de calcul est alors :

$$S_2 = S_1 - Q_g \quad \text{Eq. (2.51)}$$

L'écoulement total  $Q$  s'écrit alors :

$$Q = Q_g + \phi Pe \quad \text{Eq. (2.52)}$$

## 2.4. Méthodologie de modélisation

### 2.4.1. Le calage du modèle GR2M

Le modèle retenu (GR2M) fonctionne au pas de temps mensuel. Ce modèle, de type conceptuel, est réglé par deux paramètres (GR pour Génie Rural, 2 pour deux paramètres, M pour le pas de temps mensuel). Deux paramètres,  $X_1$  et  $X_2$ , règlent la génération des débits mensuels (figure 2.10). Les valeurs de ces deux paramètres sont déduites d'une période d'apprentissage durant laquelle sont comparés les débits observés et ceux calculés par le modèle grâce à la seule connaissance des pluies de chaque mois. A travers ces valeurs, on vise à réduire l'écart entre débits observés et débits calculés.

### 2.4.2. Choix de la variable cible

Généralement, le souci du modélisateur hydrologique est de mettre au point un outil, le plus simple possible, à efficacité donnée, permettant d'estimer des débits qui soient les plus proches possibles des débits observés. Cet outil pourra être utilisé sur des bassins très différents tels que des bassins arides ou au contraire des bassins très arrosés. D'où l'intérêt de prendre en compte d'une façon équilibrée les différentes gammes de débits écoulés sans favoriser la qualité de reproduction des faibles valeurs ou bien celle des fortes valeurs.

Cependant, les résidus d'un modèle ne sont généralement pas homoscedastiques, c'est à dire que leur variance est dépendante de la valeur du débit. Nous assistons à des valeurs de variance élevées pour des débits élevés (Mouelhi, 2003). Si nous portons le choix de la variable cible sur les débits (Q) nous aurons tendance à privilégier les bassins à fort écoulement. D'où l'intérêt de procéder par une transformation sur la variable débit (Q) dans le but de prendre en compte d'une façon relativement uniforme tous les ordres de grandeur des débits.

Une transformation puissance des débits (transformation avec puissance  $1/2$ ) permet d'avoir le cas intermédiaire entre la transformation logarithmique et la solution de prendre Q sans transformation, sans biaiser les calculs (cas d'une transformation en coefficient d'écoulement). Chiew et al. (1993) ont utilisé une telle transformation en racine carrée. Un tel choix de transformation nous permet à la fois de réduire le caractère de non-homoscedasticité des résidus des modèles d'une part, et de garder une certaine cohérence avec les travaux de Perrin (2000) qui a utilisé et validé cette transformation dans son étude comparative. Dans notre travail, c'est la variable « racine de Q » qui sera utilisée.

### 2.4.3. Choix de la fonction de critère

Il existe une bibliographie très riche présentant différentes formes de fonctions critères. Citons à titre d'exemple : le critère de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970) ; Le critère de Fortin (Fortin et al, 1971) ; etc....Le critère de Nash (équation) est un critère qui met l'accent sur les périodes de crues. En effet, la sommation des différences entre les débits observés et simulés conduit à privilégier les performances du modèle sur les périodes pour lesquelles ces différences sont les plus élevées, donc particulièrement en périodes de crues.

Pour évaluer la sensibilité du modèle aux débits moyens et aux étiages, on évalue les critères de Nash sur les racines carrées et les logarithmes des débits respectivement. Le calage des paramètres du modèle doit être effectué sur des périodes de données hydrométriques et pluviométriques les plus longues possibles, de manière à ce que le jeu de paramètres soit optimum pour le bassin, c'est à dire qu'il s'adapte au plus grand nombre de situations météorologiques possible rencontrées.

Notre choix de la forme de la fonction critère s'est porté sur le critère de Nash pour deux raisons principales:

- Une étude comparative entre différentes formes de critères a été effectuée par Servat et al. (1989) et a montré que le critère de Nash s'impose comme celui qui, globalement, permet d'accéder au meilleur calage.
- Lors de ses travaux de recherche au sein du Cemagref, Perrin (2000) a utilisé le même critère, après une étude comparative avec d'autres formes de fonctions critères, en vue d'une amélioration du modèle GR4J.

En effectuant la transformation choisie (racine de Q), le critère de Nash s'écrit comme suit :

$$F = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\sqrt{Q_i} - \sqrt{\hat{Q}_i})^2}{\sum_{i=1}^N (\sqrt{Q_i} - \sqrt{\bar{Q}})^2} \quad \text{Eq. (2.53)}$$

N : le nombre total de valeurs calculées et observées ;

Q : Lame d'eau écoulee observée ;

$\hat{Q}$  : Lame d'eau écoulee estimée par le modèle ;

$\sqrt{\bar{Q}}$  : Moyenne sur N valeurs de la racine carrée des lames d'eau écoulées observées

F prendra des valeurs allant de  $-\infty$  jusqu'à 1 ( $F \in ]-\infty, 1]$ ). Le modèle est considéré comme performant quand les débits estimés se rapprochent des débits observés, c'est à dire, quand F est proche de 1.

#### 2.4.4. Initialisation du système et période de mise en route

La mise en œuvre d'un modèle pluie-débit, l'évaluation de sa performance ainsi que l'optimisation des paramètres nous oblige à partir d'un état initial du système. Elle consiste à prédéfinir des valeurs initiales pour les paramètres du modèle avant de passer à la phase d'optimisation ou autrement dit avant sa confrontation à la réalité hydrologique observée (données). Dans le cas où le modèle comporte des réservoirs, cette phase d'initialisation consiste aussi à prédéfinir les niveaux initiaux de ceux-ci avant le calage.

Dans une modélisation empirique ou conceptuelle, cette phase d'initialisation apparaît comme une nécessité 'physique' : « *on ne peut pas savoir où on va si on ne sait pas d'où on part* » (Mouelhi, 2003). Généralement cet état initial est défini de façon arbitraire par le modélisateur. Cependant, le choix d'un état initial peut influencer le jeu optimal de paramètres du modèle ainsi que sa performance. Pour remédier à cette contrainte, on choisit généralement une période de mise en route. La période de mise en route est donc une solution au problème du choix arbitraire des niveaux initiaux des réservoirs au début de la période test.

Elle consiste à ne prendre en compte que les résultats après une durée d'observation fixée au préalable. A titre d'exemple, Perrin (2000) a utilisé une période de mise en route de 1 an. Bouabdallah (1997) a fixé la période de mise en route à deux ans lors de l'élaboration de GR1A. Nous utiliserons dans notre travail une période de mise en route de 1 an pour le pas de temps mensuel.

#### 2.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques modèles conceptuels 'à réservoirs' existants dans la bibliographie au pas de temps mensuel, pour fonder notre choix de modèle qu'on doit caler par la suite sur les données des bassins de la Soummam et de l'Isser.

Notre choix, le modèle GR2M à deux paramètres, a été motivé par la non disponibilité de données hydrométéorologiques à un pas de temps inférieur à (01) un mois pour les bassins suscités, et par le fait qu'un modèle mensuel ne doit pas dépasser plus de deux paramètres de calage (d'après les recherches effectués sur les modèles mensuels).

En outre, ce modèle a donné des résultats très satisfaisants sur les bassins du sud de la France, où les conditions y intervenant sont relativement proches de celles des bassins du nord de l'Algérie. Nous estimons donc que le modèle GR2M donnerait de bons résultats sur nos données historiques, avec sa nouvelle version 2002.



## Chapitre 3

### Présentation des caractéristiques des bassins versants de la Soummam et de l'Isser

#### 3.1. Présentation du bassin de la Soummam

##### 3.1.1. Caractéristiques physiographiques

###### 3.1.1.1. Position Géographique

Le bassin versant de la Soummam est situé dans le Nord-Est Algérien entre  $3^{\circ}40'$  -  $5^{\circ}45'$  de longitude Greenwich et  $36^{\circ}$  -  $36^{\circ}45'$  de latitude de nord. Il a une forme très irrégulière, s'étendant dans la direction Nord-Est-Sud-Ouest et vers le Sud-Est. Au nord, il est limité par les chaînes de Djurdjura, à l'est par les montagnes de la petite Kabylie et au sud par les montagnes de Bibans et de Djebel Mansourah (figure 3.1). A l'est, sa ligne de démarcation est constituée par le golfe de Bougie et par les cours de la Djemaa, de l'Agrioun et de l'el Kebir, tandis qu'au sud-est et au sud, par le chott el Hodna. A l'ouest et au nord, il est limité par les cours de l'Isser, du Sébaou et de La Daass.

###### 3.1.1.2. Morphologie et Orographie

Le bassin versant de la Soummam se compose de dix sous bassins correspondant aux unités hydrologiques (figure 3.2), certaines sont contrôlées par des stations hydrométriques. Dans le sens orographique et hydrographique, le bassin de la Soummam ne constitue pas un ensemble. Il est visiblement partagé en deux régions différant à tous les points de vue. La première région est dénommée le Sahel, y compris les cours d'eau inférieurs de la Marhir et du Boussellam. Cette région est située entre deux chaînes de montagnes : Djebel Djurdjura au nord et la chaîne des Bibans au sud. La deuxième région, plus petite, est une partie constituante du

plateau Sétifien qui est limité au nord par les versants sud de la chaîne des Bibans et au sud par les monts du Hodna. A l'est et à l'ouest, il n'y a pas de ligne de démarcation nette.

Le Djebel Djurdjura est une chaîne marquante de montagnes dans la structure de la Grande Kabylie. Au nord de Bouira, elle s'élève abruptement à la hauteur de 2123m (Dent de Lionne) pour atteindre près de Maillot sa hauteur maximale de 2308m (Lalla Khedidja). Elle se termine par la chaîne de Gouraya et son pittoresque Cap Carbon dans le Golfe de Bejaia.

Cette chaîne de montagnes anciennes possède toutes les caractéristiques des Alpes. Elle est aussi la partie la plus exposée de l'Atlas Tellien. Etendue parallèlement au bord de la mer, elle constitue une barrière puissante pour les vents marins humides soufflant dans la direction du continent. Elle empêche de même les courants d'air sahariens secs et chauds de passer vers le nord. Le Djebel Djurdjura représente pour la vallée de la Soummam le régulateur climatique principal. C'est en même temps, la région où les précipitations atmosphériques sont les plus fortes, de sorte que la Soummam en reçoit la plus grande partie de ses eaux. Il faut noter que de telles conditions naturelles exposent la chaîne de Djurdjura dans la plus grande mesure aux influences destructives de forces naturelles : à l'érosion et à la dénudation (dépôts énormes de conglomérats, de poudingues, de gravier et de sable).

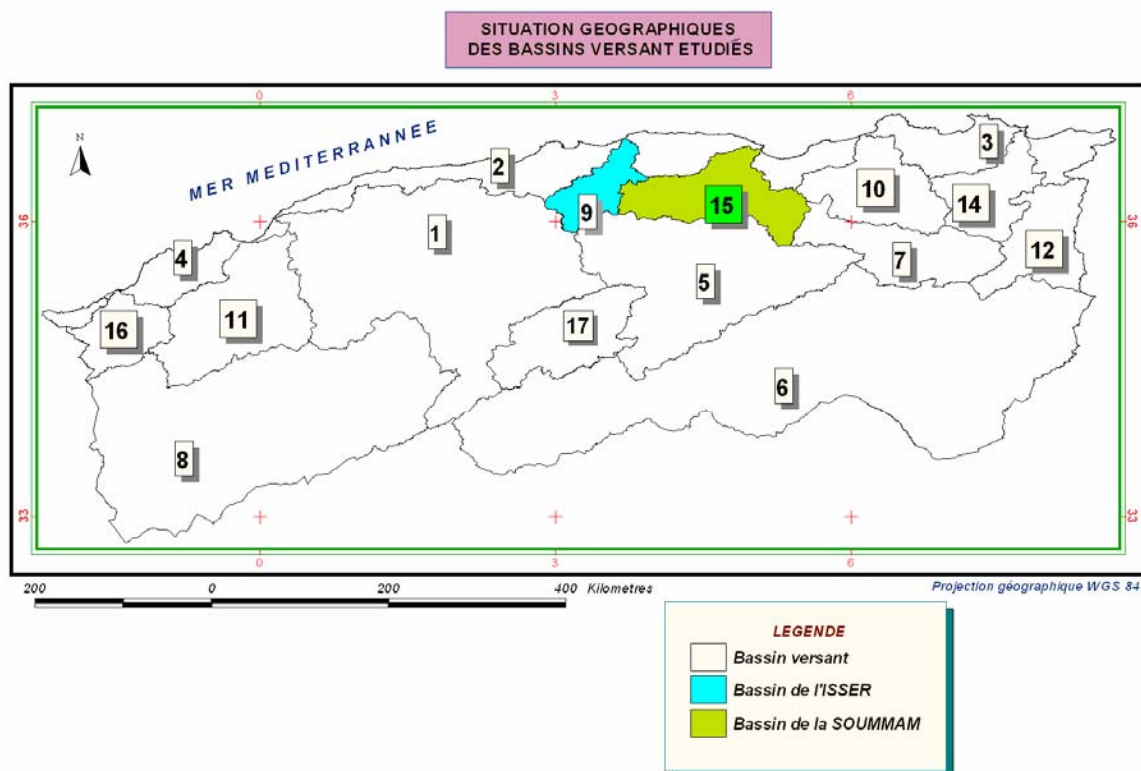


Figure (3.1) : Carte de situation des bassins étudiés

La chaîne des Bibans est une chaîne de montagnes de formation jeune, étendue sur le territoire du bassin dans la direction est-ouest. Elle pénètre dans le bassin près de Sour-el-Ghozlane et s'étend, en passant par AzerouN'said (1283m), vers Djebel Anechar (1415m). Une ramification importante de cette chaîne atteint Djebel Anini (1596m) en passant par Djebel Tafat (1615m). Cette chaîne de montagnes constituait une ligne naturelle de partage des eaux entre la vallée de la Soummam et le plateau Sétifien. Plus tard l'oued Marhir (Azerou), l'oued Mahadjar et l'oued Boussellam y ont enclavé leurs lits pour devenir des affluents de l'oued Soummam. Du côté est du bassin, autour du cours d'eau inférieur de Bou Sellam et au sud de la Soummam, une région montagneuse a été formée qui s'étend d'Akbou , par Djebel Trouana (1389m), vers Djebel Babor (2004m) à l'est. C'est la branche ouest de petite Kabylie. Elle a apparu comme conséquence de mouvements tectoniques puissants accompagnés d'épanchements éruptifs, ce qui fait qu'elle n'a pas une forme unifiée. Ces caractéristiques climatiques sont en beaucoup de points semblables à celles du Djurdjura et est constituée par des roches moins résistantes.

La limite sud de la partie ouest du bassin est composée par une série de crêtes plus petites, mutuellement séparées : Djebel Dira(1810m), Djebel Choukhot (1832m) et Djebel Mansourah (1862m). Ces crêtes délimitent nettement les terrains montagneux de l'Atlas tellien du plateau situé au sud, connu sous le nom de la plaine du Hodna. Le plateau Sétifien est un plateau élevé, limité au nord par les rameaux de la chaîne des Bibans et au sud par la chaîne des monts du Hodna. IL s'étend à partir de la dépression Medjana à l'ouest, tandis qu'à l'est il est ouvert vers le plateau de Eulma. L'altitude moyenne du plateau Sétifien est de 1000m ; il est doucement penché vers l'est.

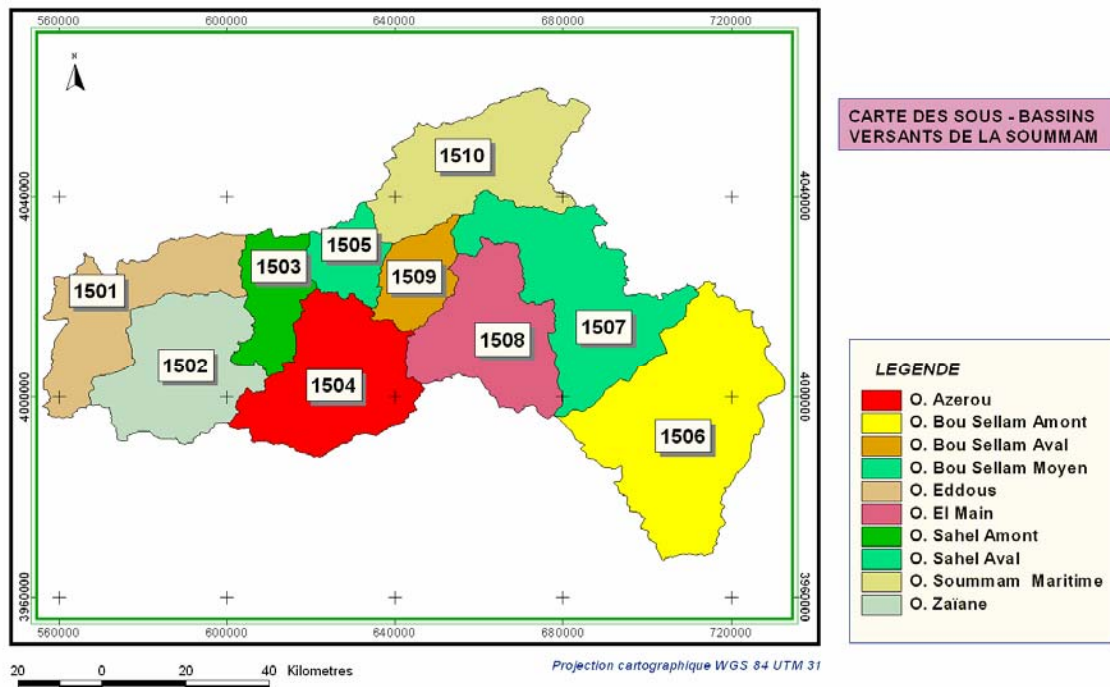


Figure 3.2. : Carte des sous-bassins versants de la Soummam

### 3.1.1.3. La courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle exprime ainsi la superficie du bassin ou le pourcentage de superficie, au-delà d'une certaine altitude. Dans un contexte d'évolution géomorphologique selon le modèle de Davis, cette courbe permet de se renseigner sur le niveau de maturité d'un cours d'eau.

Les courbes hypsométriques demeurent un outil pratique pour comparer plusieurs bassins entre eux ou les diverses sections d'un seul bassin. Elles peuvent en outre servir à la détermination de la pluie moyenne sur un bassin versant et donnent des indications quant au comportement hydrologique et hydraulique du bassin et de son système de drainage. La courbe hypsométrique est obtenue par le cumul de l'histogramme des altitudes et elle permet de calculer l'altitude moyenne, l'altitude la plus fréquente et l'indice de pente globale du bassin

**Courbe hypsométrique du bassin versant de la Soummam**

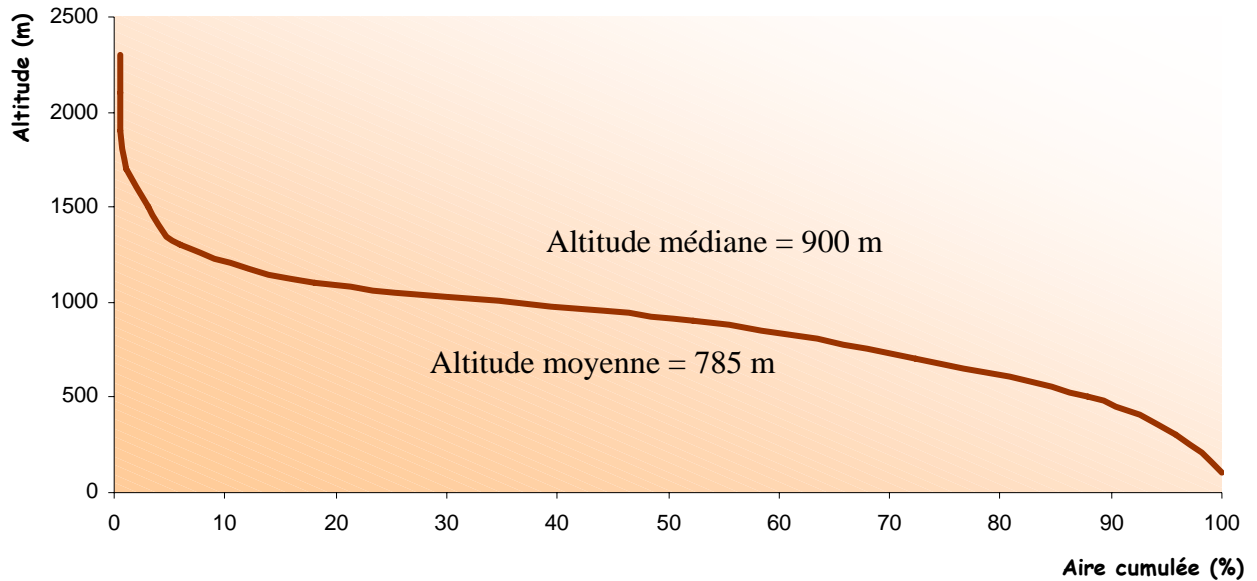


Figure (3.3) : Courbe hypsométrique du bassin de la Soummam

Cette courbe hypsométrique nous permet de déduire les caractéristiques données dans le tableau (3.1)

Tableau 3.1 : Caractéristiques des bassins de la Soummam et de l'Isser

<b>Caractéristiques du bassin</b>	<b>Bassin de la Soummam</b>	<b>Bassin de l'Isser</b>
Aire	9200 km <sup>2</sup>	4150 Km <sup>2</sup>
Périmètre	655 km	440 Km
Indice de compacité (Gravelius, 1914)	1.63	1.90
Altitudes caractéristiques :		
Altitude maximale	2308	1810 m
Altitude minimale	2 m	90 m
Altitude moyenne	785 m	710 m
Altitude médiane	900 m	760 m
Indice de pente global	0.45 %	0.09 %
Largeur du rectangle équivalent	40 km	37 km
Longueur du rectangle équivalent	240 km	98 km

### 3.1.1.4. Caractéristiques agro-pédo-géologiques

#### a) Aperçu Géologique

La figure (3.4) représente les différentes formations géologiques de la région de la Soummam : dont on rencontre:

- ❑ **Le Quaternaire** : représenté par des alluvions le long des oueds et au niveau des hautes plaines.
- ❑ **Le Pliocène Continental** : le coteau du Sahel est couronné par des graviers siliceux et fluviaux. Ailleurs, il est conglomératique sinon caillouteux.
- ❑ **Le Miocène**; il s'agit essentiellement du Miocène inférieur. Il est continu depuis l'ouest de Bejaia jusqu'aux environs de Sidi-Aich. Il affleure également du côté de Dj. Mansourah sous forme de grés.
- ❑ **L'Oligocène** : il est généralement argilo-gréseux. Il affleure en abondance à partir de Tazmalt et de part et d'autre de la vallée de la Soummam, en allant vers l'ouest. On note également sa présence au niveau de la chaîne de Gouraya et de la région de Béni-Mansour.
- ❑ **L'Eocène** : il est quasiment marneux, parfois calcaro-marneux. Il affleure surtout au niveau des hautes plaines.
- ❑ **Le Crétacé** : se présente, en général, sous forma de flyschs. Il est étendu, continu depuis la chaîne des Bibans jusqu'aux montagnes de la petite Kabylie. Le faciès est marneux au Crétacé supérieur (Sénonien). Il est schisteux, sous forme de bancs de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur avec quelques intercalations de grés au crétacé moyen (Albien) et apparaît dans la région de Béni-Mansour et la chaîne des Bibans. Il est gréseux pélitique, parfois carbonaté-gréseux au crétacé inférieur.
- ❑ **Le Jurassique** : il affleure surtout au niveau de la chaîne calcaire et le long de sa continuité vers l'est. Il est principalement calcaro-dolomitique.
- ❑ **Le Trias** : il est de faciès gypso-salin et apparaît le long de contacts anormaux (contact des nappes de charriage) dans le Tell méridional et est présenté par des conglomérats et des grés rougeâtres dans le Tell septentrional.

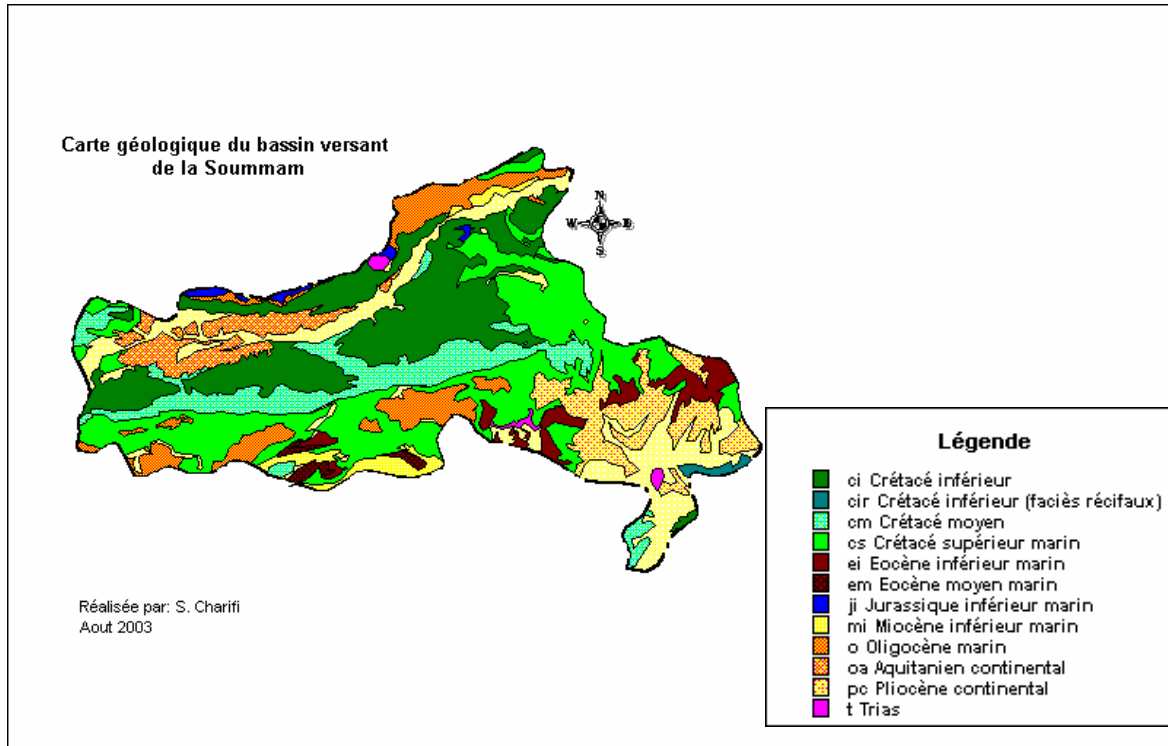


Figure (3.4) : Carte géologique du bassin versant de la Soummam

### b) Les sols

La carte des sols du bassin de la Soummam a été extraite de la carte des sols de l'Algérie au 1/500.000<sup>e</sup> faite par J. Durand en 1954. La numérisation de cette carte sur le SIG 'Systèmes d'Information Géographiques' ArcView est présentée dans la figure (3.5).

La majorité des sols dans le bassin de la Soummam sont des sols calcaires (riches en calcaire). Leur complexe absorbant est modifié par l'eau d'une façon telle que H peut atteindre 20% de la capacité totale. Ces sols ont généralement une texture légère et sont donc perméables. Lorsque les matières organiques atteignent 25%, on est en présence de la variété humifère de ces sols, qui peuvent présenter alors une texture relativement lourde allégée par la présence des matières organiques.

Au nord du bassin, on rencontre des sols insaturés qui ne contiennent pas de calcaire dont l'argile peut être plus abondante en surface qu'en profondeur ; leurs roches mères sont généralement imperméables ou donnent des produits de décomposition imperméables.

Le long des oueds, les sols existants sont des dépôts alluviaux appelés sols alluviaux à profil indifférencié ou présentent une simple accumulation de matières organiques en surface. En outre on rencontre, en petites quantités, des sols

calciques et des sols en équilibre peu épais, plus ou moins riches en calcaire et très pauvres en sels solubles.

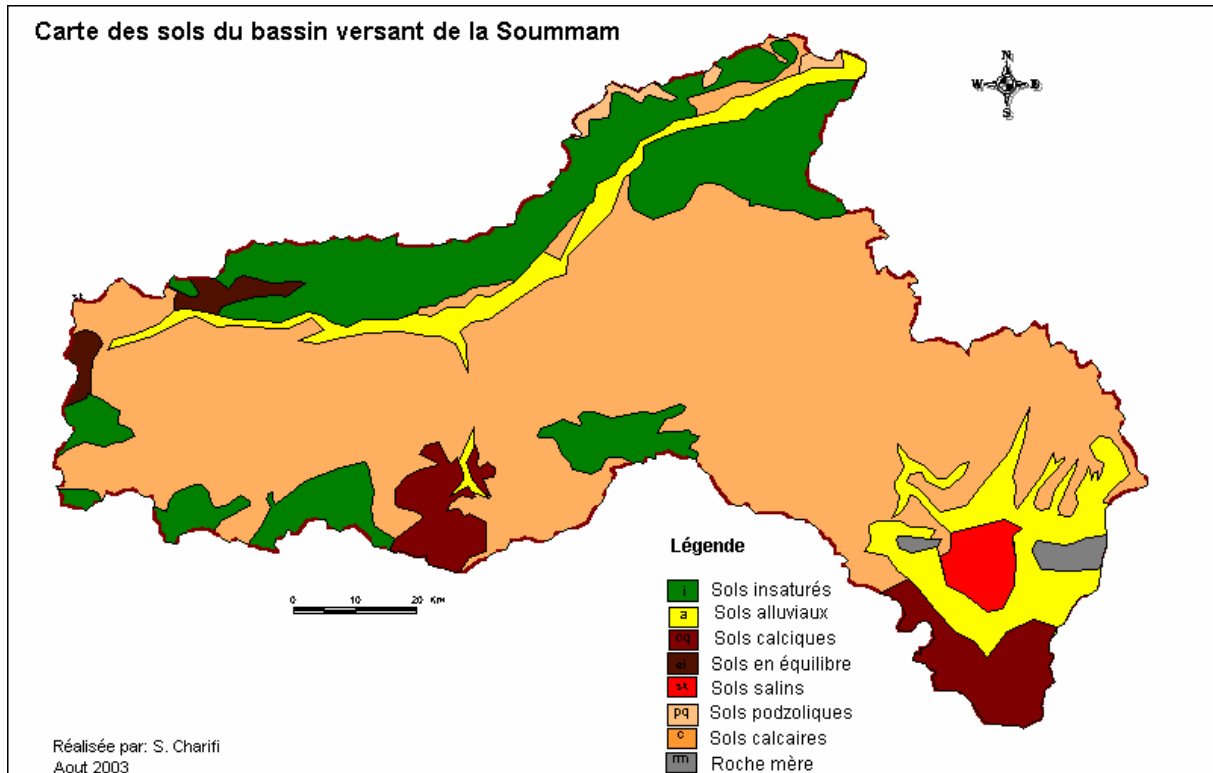


Figure (3.5) : Carte des sols du bassin de la Soummam

### c) Paramètres Physiographiques

La végétation du bassin versant de la Soummam est de type Méditerranéen et est très variée. Les régions alluvionnaires de la haute Soummam sont occupées par des chênaies. La basse et moyenne Soummam sont occupées par des oliveraies et des vignobles. Dans la région de la moyenne Soummam, le couvert végétal est moins dense.

#### 3.1.1.5. Aperçu Hydrogéologique

Les rapports hydrogéologiques et les comptes rendus effectués dans le bassin versant de la Soummam ont permis d'y identifier trois unités hydrogéologiques principales : unité de Setif qui s'étend sur la zone de Sétif occupant le bassin versant de oued. Boussellam., unité de la haute et moyenne Soummam couvrant la dépression entre les monts du Djurdjura au Nord et les Bilans au Sud et unité de la basse Soummam depuis la station hydrométrique de Sidi-Aich sur l'oued Soummam jusqu'à la mer.



**Formations Aquifères :** Ce sont dans l'ordre stratigraphique :

- les séries du Crétacé inférieur de la région de Sétif (calcaires et grès) principalement les dolomies et les calcaires récifaux très perméables du Dj Youssef
- les calcaires maestrichtiens (Crétacé supérieur) et surtout les calcaires yprésiens (Eocène inférieur) du plateau de Sétif et de la haute Soummam.
- les calcaires et dolomies liasiques (et Lutétien) des sommets du Djurdjura constituant plusieurs petits massifs dont la partie la plus importante se situe dans le bassin de Sébaou. Très karstiques, ils sont à l'origine de sources à débit élevé.
- les poudingues miocènes des régions de Bouira et El Asnam dans la haute Soummam.
- les terrasses alluviales des oueds qui sont en général, des sables et des graviers de bonne perméabilité. Plus développées dans la vallée de la Soummam depuis Tilesdit (surtout en aval d'Akbou), elles constituent avec les nappes du plateau de Sétif la principale ressource en eau souterraine de toute la région. Elles recèlent également de petites nappes dans les plaines côtières qui s'étendent entre Bougie et l'oued Agrioun où elles sont associées à des dunes de sable anciennes ou récentes.

A l'exception des calcaires du Djurdjura qui se présentent en d'épaisses lentilles pouvant dépasser 500 m, la puissance des diverses formations aquifères considérées est de l'ordre de quelques dizaines de mètres, en général 10 à 25 m (les alluvions de l'oued Soummam, au maximum 50 m dans les calcaires éocènes et les calcaires lacustres de Sétif). La perméabilité y est généralement bonne de l'ordre de  $10^{-4}$  m/s, à l'exception pour la nappe pliocène de la basse Soummam ( $10^{-5}$  m/s).

**Résurgences :** La majeure partie des eaux infiltrées sur les reliefs résurge dans les sources qui alimentent les oueds. Il existe de nombreuses émergences dans les ensembles géologiques cités. En bordure du Djurdjura dont les plus importantes sont : la source noire (commune des Saharidj) destinée à l'électrification et à l'irrigation, Ain Tixeraine et Acif El Hammam, Ain-Ras et les sources de Pascal et de Colbert.

### 3.1.1.6. Hydrographie et paramètres morphométriques

Le bassin versant de la Soummam est hydrographiquement très développé. Trois rivières et leurs affluents constituent son squelette hydrographique fondamental : le Sahel, affluent venant du nord-ouest, le Boussellam venant du sud-est et la Soummam, qui se forme à Akbou au confluent du Sahel et du Boussellam et coule en direction du nord-est vers la mer (figure 3.6).

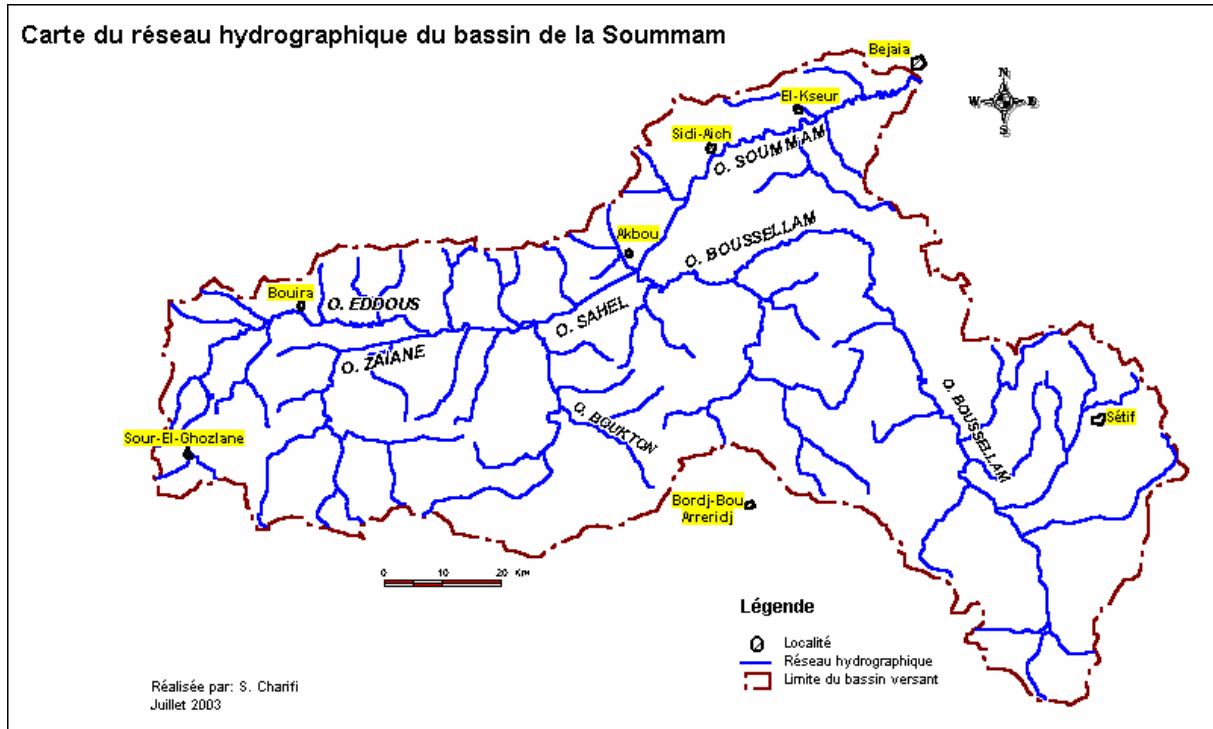


Figure (3.6) : Carte du réseau hydrographique du bassin de la Soummam

**Paramètres Morphométriques :** pour définir un réseau hydrographique, il existe divers paramètres descriptifs appelés paramètres morphométriques, présentés ci-dessous :

- **Classification du chevelu hydrographique,** De nombreuses études se sont intéressées à la classification des cours d'eau d'un réseau hydrographique, dans le but de donner une information synthétique de la morphologie du bassin d'alimentation. Plusieurs classifications ont été proposées dont les deux plus usuelles sont celles de Horton (1945) et de Strahler (1952). Ces deux classifications utilisent le terme de bief, qui correspond à la fraction du réseau hydrographique comprise soit entre deux confluences soit entre une source et une confluence. Le bief est dit bief intérieur dans le premier cas et bief extérieur s'il est issu d'une source. Comme la classification de Horton (1945) se définit par des règles d'indexation des biefs à partir de la notion de cours d'eau le plus long, on lui préfère la classification de Strahler (1952) régie par les trois règles suivantes (figure 3.7):
  1. tout bief sans affluent est d'ordre 1
  2. quand deux biefs d'ordre  $i$  et  $j$  différents, avec  $i > j$ , convergent, le bief aval est d'ordre  $i$
  3. quand deux biefs de même ordre  $i$  convergent, le bief aval est d'ordre  $i+1$ .

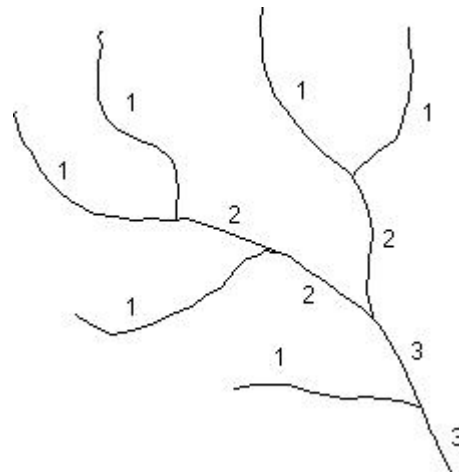


Figure (3.7) : Définition des ordres du réseau selon la méthode de Strahler

Cette classification permet de hiérarchiser les biefs suivant leur degré de connexion. On définit le tronçon comme l'ensemble des biefs de même ordre, successifs dans le sens de l'écoulement. L'ordre du bassin appelé magnitude du réseau et noté  $\Omega$ , est défini comme l'ordre le plus élevé des tronçons du bassin ; c'est par conséquent l'ordre du tronçon à l'exutoire. Le chevelu hydrographique du bassin versant de la Soummam classé selon STRAHLER est d'ordre 7 (figure 3.8).

- **Le degré de développement du réseau**

**A. La densité de drainage :** Le drainage du bassin est habituellement caractérisé par la **densité de drainage**, définie comme le rapport entre la longueur cumulée des drains du bassin et sa surface.

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} \quad \text{Eq. (3.1)}$$

Avec :  $D_d$  : densité de drainage [ $\text{km}/\text{km}^2$ ] ;  $L_i$  : longueur de cours d'eau [ $\text{km}$ ] ;  $A$  : surface du bassin versant [ $\text{km}^2$ ].

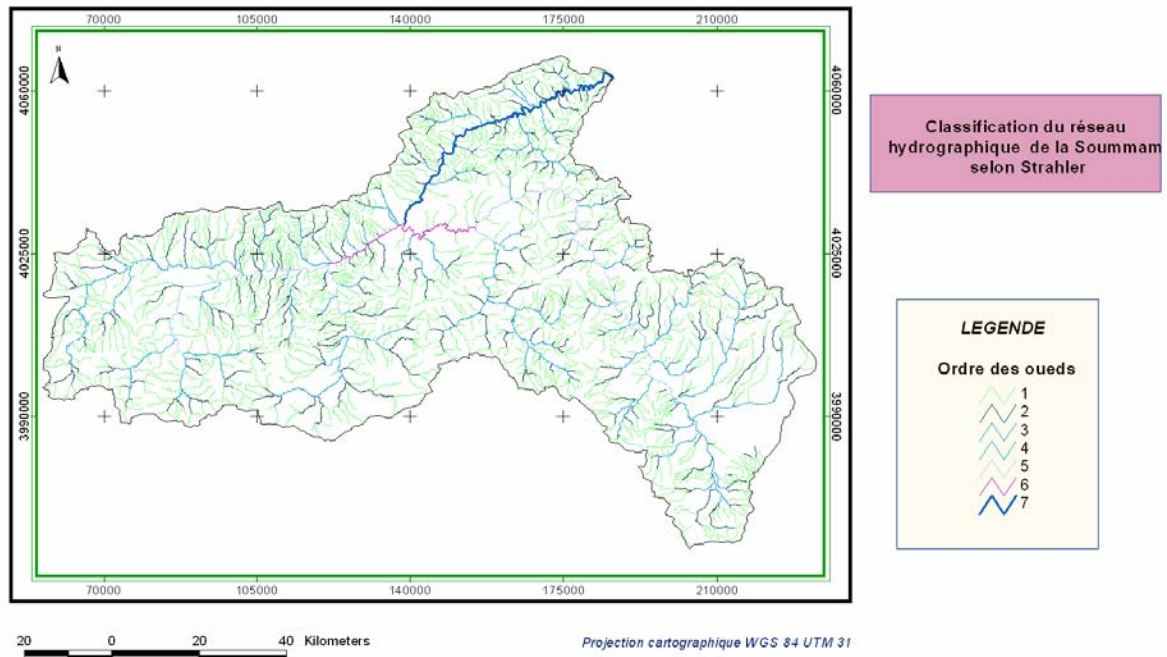


Figure (3.8) : Classification du réseau hydrographique de la Soummam selon Strahler

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques. En pratique, les valeurs de densité de drainage varient de 3 à 4 pour des régions où l'écoulement n'a atteint qu'un développement très limité et se trouve centralisé; elles dépassent 1000 pour certaines zones où l'écoulement est très ramifié avec peu d'infiltration. Selon Schumm, la valeur inverse de la densité de drainage,  $C=1/D_d$ , s'appelle « constante de stabilité du cours d'eau ». Physiquement, elle représente la surface du bassin nécessaire pour maintenir des conditions hydrologiques stables dans un vecteur hydrographique unitaire (section du réseau).

**B. La densité hydrographique :** la densité hydrographique appelé aussi la **fréquence de drainage**, est définie comme le nombre de drains du bassin par unité de surface.

$$F = \frac{\sum N_i}{A} \quad \text{Eq. (3.2)}$$

Où :  $F$  : densité hydrographique [ $\text{km}^{-2}$ ];  $N_i$  : nombre de cours d'eau;  $A$  : superficie du bassin [ $\text{km}^2$ ].

Il existe une relation assez stable entre la densité de drainage  $D_d$  et la densité hydrographique  $F$ , de la forme :

$$F = a \cdot D_d^2 \quad \text{Eq. (3.3)}$$

Où,  $a$  est un coefficient d'ajustement.

**C. Le rapport de confluence :** Sur la base de la classification des cours d'eau, Horton (1932) et Schumm (1956) ont établi différentes lois statistiques, dites lois de Horton ; elles sont définies entre les tronçons d'ordre différents par les quatre rapports suivants :

- $R_B$  Ratio de bifurcation (rapport de confluence) :  $R_B = N_\omega / N_{\omega+1}$ , avec  $N_\omega$  nombre de tronçons d'ordre  $\omega$ . Le rapport de confluence est un nombre sans dimension exprimant le développement du réseau de drainage. Il varie suivant l'ordre considéré. C'est un élément important à considérer pour établir des corrélations d'une région à une autre.
- $R_L$  rapport des longueurs sommées :  $R_L = L_{\omega+1} / L_\omega$ , où  $L_\omega$  est la somme des longueurs des tronçons d'ordre  $\omega$ .
- $R_l$  rapport de longueurs :  $l_{\omega+1} / l_\omega$ , où  $l_\omega$  est la longueur moyenne des tronçons d'ordre  $\omega$ .
- $R_a$  rapport des aires drainées :  $R_a = A_{\omega+1} / A_\omega$ , où  $A_\omega$  est l'aire moyenne (totale) drainée par les tronçons d'ordre  $\omega$  (donc  $A_{\omega+1} > A_\omega$ ).

Les lois de Horton font l'hypothèse que ces ratios sont constants et liés par la relation suivante :  $R_l = R_B / R_L$ .

**D. Coefficient de torrentialité ;** le coefficient de torrentialité est obtenu à l'aide de la relation :

$$C_t = \frac{N_1}{A} \cdot D_d \quad \text{Eq. (3.4)}$$

$N_1$  : nombre de talwegs d'ordre 1

$A$  : superficie du bassin en  $\text{Km}^2$

$D_d$  : densité de drainage en  $\text{Km} / \text{Km}^2$

$C_t$  : coefficient de torrentialité

Tableau 3.2 : Paramètres morphométriques des bassins de la Soummam et de l'Isser

<b>Paramètres morphométriques</b>	<b>Bassin de la Soummam</b>	<b>Bassin de l'Isser</b>
Classification du chevelu hydrographique	Ordre 7	Ordre 6
Densité de drainage	0.70 km / km <sup>2</sup>	0.61 km / km <sup>2</sup>
Densité hydrographique	0.20 km <sup>-2</sup>	0.14 Km <sup>-2</sup>
Coefficient de Torrentialité	0.108	0.064
Constante de stabilité	1.43	1.64

### 3.1.1.7. Aperçu climatique

La région hydrographique de la Soummam est sous la dépendance de trois types de climat : climat littoral tempéré sur le cours inférieur de l'Oued Soummam, climat de l'Atlas Tellien sur la moyenne Soummam et sur une partie du haut bassin de la Soummam (Oueds Sahel - cours inférieur de l'Oued Bou-Sellam) et climat des hautes plaines sur le haut bassin de l'Oued Bou Sellam. Une carte des étages bioclimatiques et représentée dans la figure (3.9).

#### a) Climat littoral

La température moyenne varie de 18°C sur la côte à 15°C sur les reliefs très accentués l'amplitude annuelle des moyennes mensuelles varie de 14°C à 16°C. L'humidité relative est assez élevée et présente un cycle diurne de très faible amplitude. Les moyennes annuelles sont de 70% à 21 heures et de 60 à 65 % à 13 heures. La pluviométrie moyenne annuelle croît modérément d'Ouest en Est, mais de façon plus nette avec l'altitude. Elle passe de 400 - 500 mm dans la vallée de la Soummam à 800 mm en altitude. Le régime pluviométrique présente un maximum de précipitations en Décembre et un minimum en Juillet. L'alternance des brises de mer et de terre constitue un des traits les plus caractéristiques de ce type de climat. Le sirocco souffle de 20 à 30 jours par an. Les gelées blanches sont excessivement rares, de 0 à 2 jours par an en moyenne.

#### b) Climat de l'Atlas tellien

Le climat de l'Atlas Tellien présente un degré de continentalité qui croît très rapidement au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la mer. Les températures moyennes annuelles décroissent de 17° C à 10° C par effet orographique et

l'amplitude des moyennes mensuelles varie de même de 16° C à 20° C. L'humidité relative présente un cycle diurne assez marqué (moyennes annuelles : 70% à 7 heures et 50% à 13 heures). La pluviométrie annuelle moyenne décroît très sensiblement du Nord vers le Sud ainsi que des sommets vers les plaines. L'Atlas Tellien agit donc comme un rempart provoquant les précipitations les plus abondantes sur les massifs les plus élevés et les plus proches de la mer. Ainsi, sur l'Oued Sahel, les précipitations annuelles peuvent atteindre 600 mm mais ne dépassent pas 400 mm sur la chaîne des Bibans.

Sur l'Oued Boussellam, la partie du bassin versant régie par le climat de l'Atlas Tellien reçoit des précipitations annuelles allant de 500 mm dans le Nord, à 200 mm dans le Sud. Il pleut en moyenne de 70 à plus de 100 jours par an. Le régime des pluies mensuelles présente généralement un maximum en Janvier et un minimum en Juillet et Août. L'enneigement est un trait caractéristique du climat de l'Atlas Tellien. La neige tombe en moyenne 20 jours par an sur les sommets (au dessus de 1200 m). La couche au sol est variable mais atteindrait 50 à 60 cm en moyenne aux altitudes dépassant 1.000 à 1.100m (Djebel Djurdjura et Babors principalement). Les gelées blanches ont une fréquence annuelle allant de 10 à 50 jours en moyenne et la vallée de la Soummam y est la plus exposée (plus spécialement dans les régions de Bouira - EL-Asnam et Maillot). Le sirocco souffle en moyenne de 30 à 75 jours par an, et là encore, sa fréquence est maximale dans la vallée de la Soummam (El-Asnam en particulier).

### **c) Climat des hautes plaines telliennes**

Le climat des hautes plaines telliennes est typiquement continental :

Les températures moyennes annuelles varient de 15 à 10 °c en fonction de l'altitude croissante et l'amplitude des moyennes mensuelles oscille entre 20 et 21 °c.

La pluviométrie moyenne annuelle varie de 250 à 500 mm avec l'accroissement d'altitude. En général, il pleut de 50 à 100 jours par an. Le régime des pluies mensuelles présente un maximum principal en Janvier mais les pluies orageuses d'automne et de printemps prennent sous ce climat une importance non négligeable, principalement en Mai où l'on observe fréquemment un maximum secondaire.

Les gelées blanches sont très fréquentes (60 à 70 jours par an en moyenne). Elles se produisent de Novembre à Avril avec un maximum en Janvier (15 jours en moyenne). Le sirocco est également fréquent (40 à 55 jours par an en moyenne). Il faut toutefois noter la position privilégiée de Sétif pour laquelle les fréquences des gelées blanches et du sirocco sont respectivement de 34 et 15 jours par an.

La figure (3.10) représente une esquisse générale de la répartition des températures sur le bassin versant de la Soummam "isothermes annuelles".

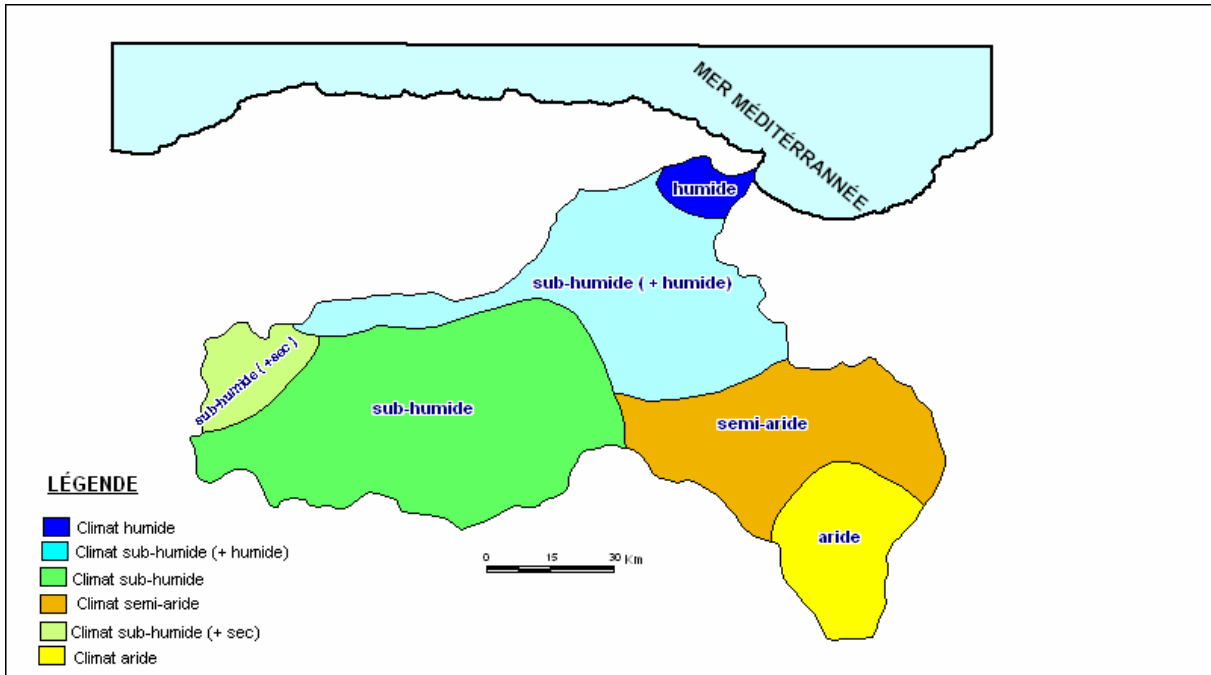


Figure (3.9) : Etages bioclimatiques du bassin de la Soummam

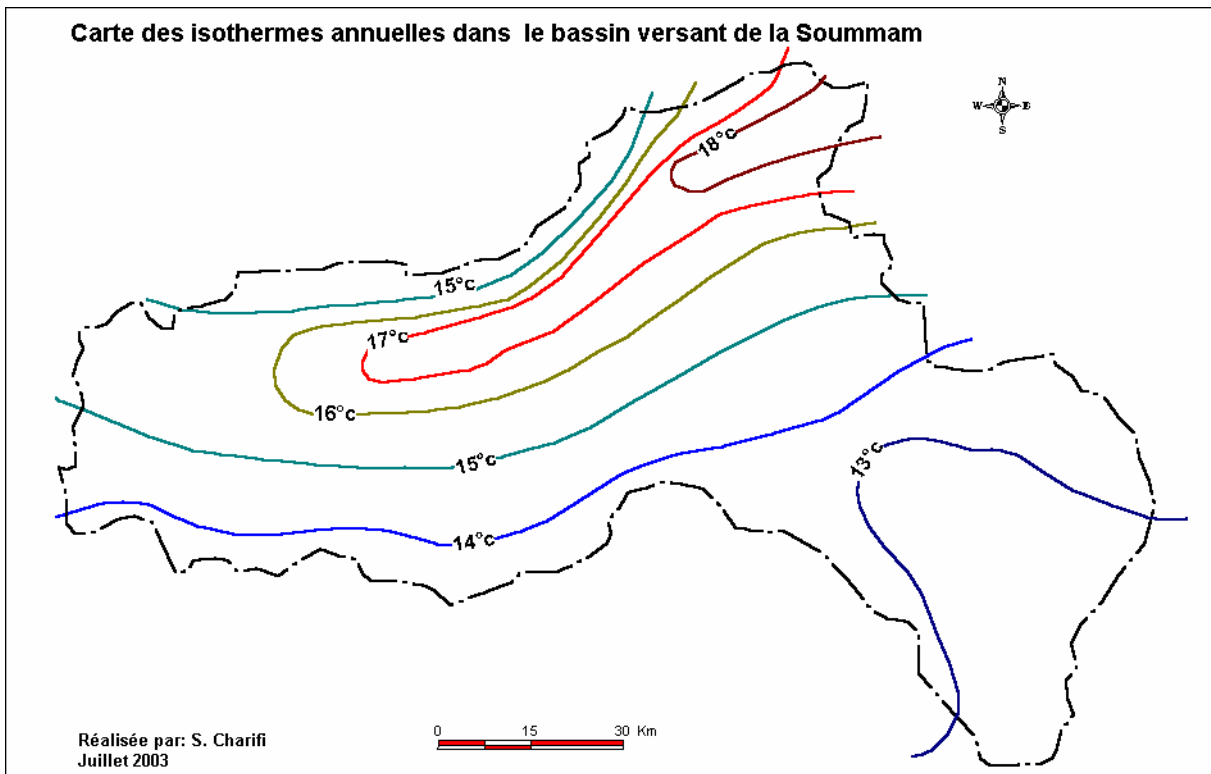


Figure (3.10) : Carte des isothermes annuelles du bassin de la Soummam



## 3.2. Présentation du bassin versant de l'Isser

### 3.2.1. Caractéristiques Physiographiques

#### 3.2.1.1. Position Géographique

Le bassin versant de l'Isser limité à Lakhdaria est situé à environ 70KM au Sud-Est d'Alger ; il présente sensiblement la forme d'un quadrilatère d'orientation Sud-Ouest/Nord-Est. Il couvre une superficie, au site de Lakhdaria, d'environ 4000 km<sup>2</sup>. A l'est, ce bassin se joint à la chaîne montagneuse de la grande Kabylie et il est séparé par le massif de Krachema sur deux périmètres : bas et moyen Isser.

#### 3.2.1.2. Morphologie et Orographie

Le cadre géographique dans lequel se développe le bassin versant est constitué essentiellement de l'Atlas Tellien Algérois au Nord qui culmine à 1130m au Djebel Tamesguida et de la chaîne des Bibans au sud qui culmine à 1810m au Djebel Dira. Ces deux chaînes étant séparées par la plaine des Aribes d'altitude 550m.

Le bassin de l'Isser est subdivisé en cinq sous-bassins, chacun est contrôlé par une station hydrométrique située sur l'oued considéré.

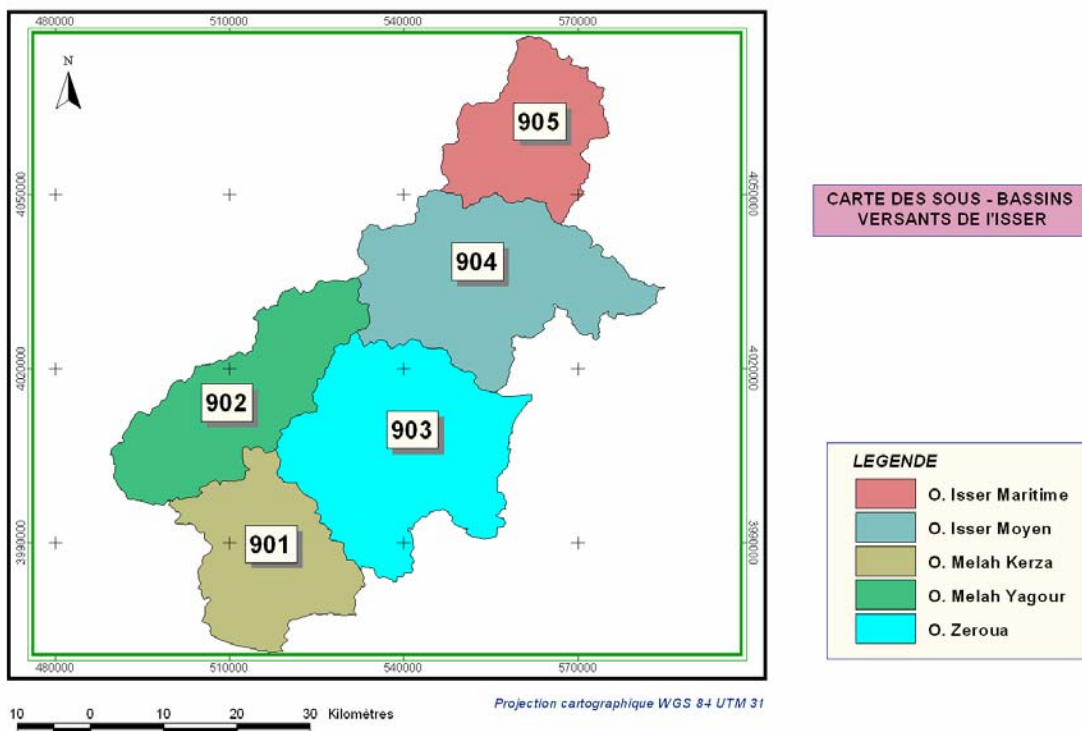


Figure 3.11. : Carte des sous-bassins versants de l'Isser

Le bassin versant de l'Isser, dont les lignes de crête se situent entre 90 et 1810m, présente une altitude moyenne de 710m.

### 3.2.1.3. Courbe hypsométrique

L'hypsométrie du bassin de l'Isser est donnée dans le tableau (3.1), présenté ci-dessus. La courbe hypsométrique est illustrée par la figure (3.12).

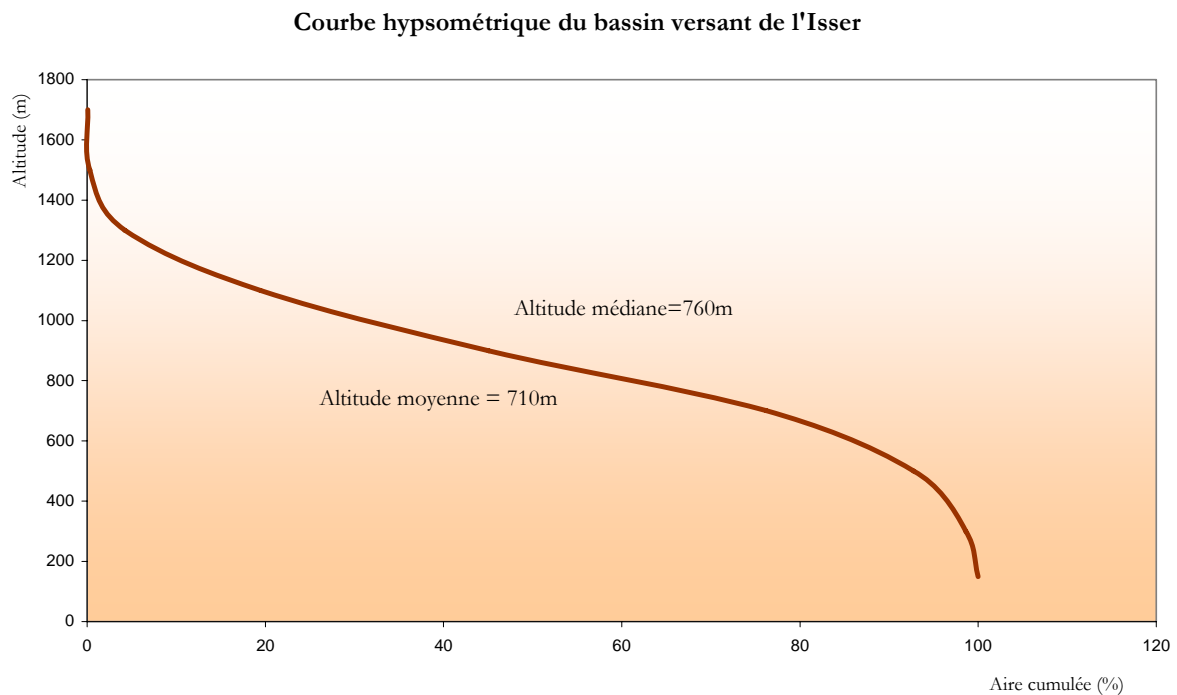


Figure 3.12 : Courbe hypsométrique du bassin de l'Isser

### 3.2.1.4. Caractéristiques agro-pédo-géologiques

#### a) Aperçu géologique

La région de l'Isser est caractérisée par différentes formations allant de terrains azoïques (formés par le massif schisto-cristallin de Krachna (200m)) au quaternaire le plus récent. Le secondaire est représenté par le crétacé inférieur et supérieur, le moyen manque. Le tertiaire par l'éocène, l'oligocène et le miocène, le pliocène est absent. Le crétacé inférieur albo-aptien est développé dans le moyen Isser sur une bande de Lakhdaria et Kadiria, elles sont représentées par des schistes argileux et marnes grises. Le crétacé supérieur se trouve dans la partie de la rive gauche de la vallée du moyen Isser. De Palestro à Laperrine et est composé de marnes schisteuses à la base desquelles des marnes calcaires intercalées de calcaires marneux. (voir figure (3.13)).

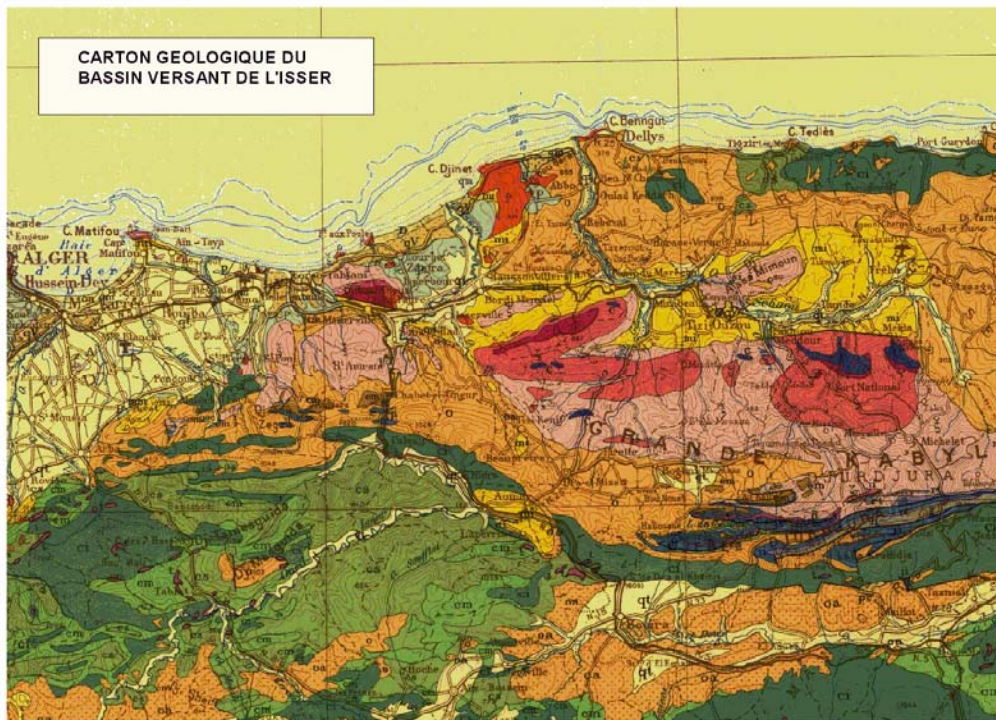


Figure 3.13 : Aperçu géologique du bassin de l'Isser

Les affleurements de l'éocène supérieur sont observés en forme de petites taches isolées dans la région de Souk-el-Had et sont représentés par des marnes claires et comprennent de nombreuses assises de calcaires, de grès et des quartzistes. Les terrasses du quaternaire moyen forment la première et la deuxième terrasse au dessus du lit majeur de l'Isser. En général le quaternaire prédomine. Les formations alluviales occupent la plus importante place formant la vallée de l'Isser et de ces affluents.

On trouve essentiellement des marnes et des marno-calcaires (50% de la superficie du bassin versant). C'est des formations facilement érodables par l'action mécanique des eaux de pluies. La présence de grès essentiellement quartzeux (qui se désagrègent facilement), des argiles rouges (13%) de la superficie du bassin pures ou chargés de sables et de grès, donne au sol une faible résistance à l'érosion. La géologie du bassin versant de l'Isser, avec ses formations généralement imperméables et facilement affouillables, favorise le phénomène de l'érosion des versants et des berges de l'oued.

## b) Les sols

On observe une certaine loi dans la répartition des sols en fonction de la topo-lithologie. Le long de l'oued se trouve des sols peu évolués formés sur des apports alluviaux et colluviaux, dont les sols aux textures fines, localisés dans les micro-cuvettes. Des sols de type calcaire se trouvent sur les vallées à faible pente.

On rencontre également des sols minéraux bruts non climatiques, caractérisés par une absence complète de l'humus, ayant un processus d'altération très faible, ce qui fait que la constitution de ces sols est essentiellement de fragments de roches mère grossières ou plus ou moins fine ayant subi une simple désagrégation physique.

Il existe aussi dans la vallée de l'Isser des sols hydromorphes, due au défaut de l'infiltration de l'eau (centre des cuvettes de la terrasse récente) (M. Halfaoui, 1976). Ces sols ont une texture lourde. En outre, les vertisols sont rencontrés avec une texture fine à très fine, caractérisée par une composition chimique-sialitique très prononcée, prédominance des argiles du groupe montmorillonite. La carte des sols du bassin de l'Isser est donnée dans la figure (3.14).

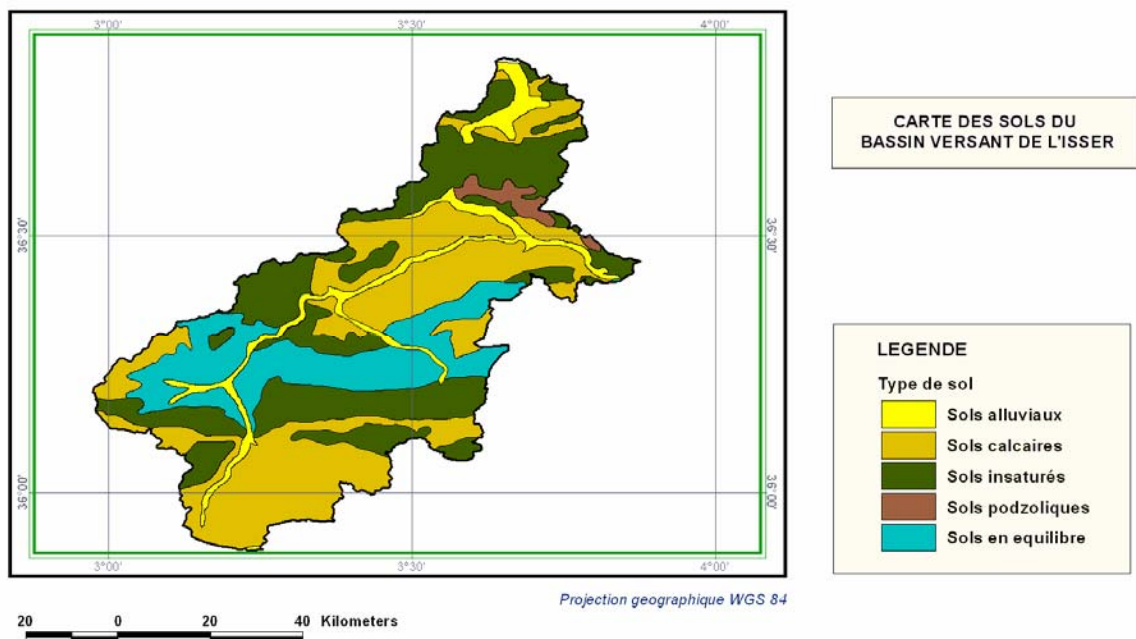


Figure 3.14 : Carte des sols du bassin de l'Isser

### **c) Paramètres Physiographiques**

Le couvert végétal du bassin versant de l'Isser est largement insuffisant. Les pentes les plus raides du bassin sont le plus souvent sans couvert végétal ou couverts de broussailles clairsemées. On rencontre sur les collines quelques forêts avec, comme principale essence le pin d'alep. Sur le reste du bassin on trouve des cultures essentiellement céréalières.

#### **3.2.1.5. Aperçu Hydrogéologique**

Les conditions hydrogéologiques sont déterminées par la composition géologique de la région. Les meilleurs aquifères sont situés dans les terrains quaternaires qui forment la vallée de l'oued Isser. Les bordures et le fond de la vallée sont constitués de terrains anti-quaternaires (grès-poudingues, schistes, conglomérats, roches éruptives), qui bien que perméables, ne contiennent pratiquement pas d'eau.

Les formations quaternaires se différencient par leur importance, leur épaisseur, la composition des roches perméables et leurs qualités aquifères. Du point de vue hydrogéologique, on rencontre les formations aquifères suivantes :

- nappe de la terrasse littorale du quaternaire inférieur
- nappe des alluvions du quaternaire inférieur
- nappe des alluvions du quaternaire moyen
- nappe des alluvions du quaternaire récent et actuel
- nappe des formations dunaires éoliennes actuelles.

#### **3.2.1.6. Hydrographie et paramètres morphométriques**

Sur toute son étendue, l'Isser est un oued typique de montagne avec une forte pente drainant un bassin de 4145 km<sup>2</sup> avec un grand nombre d'affluents, morcellent intensivement les flancs des massifs et formant le bassin de l'Isser. Tous les oueds de la région sont de type d'alimentation pluviale ; ils provoquent de grandes crues en hiver et au printemps quand les précipitations sont maximales. L'étiage correspond à la période la plus sèche quand les principaux oueds se dessèchent et il n'en reste que d'étroits filons d'eau. La carte du réseau hydrographique du bassin de l'Isser est donnée dans la figure (3.15). Les paramètres morphométriques du bassin de l'Isser sont donnés dans le tableau (3.2), et la classification du réseau hydrographique dans la figure (3.16).

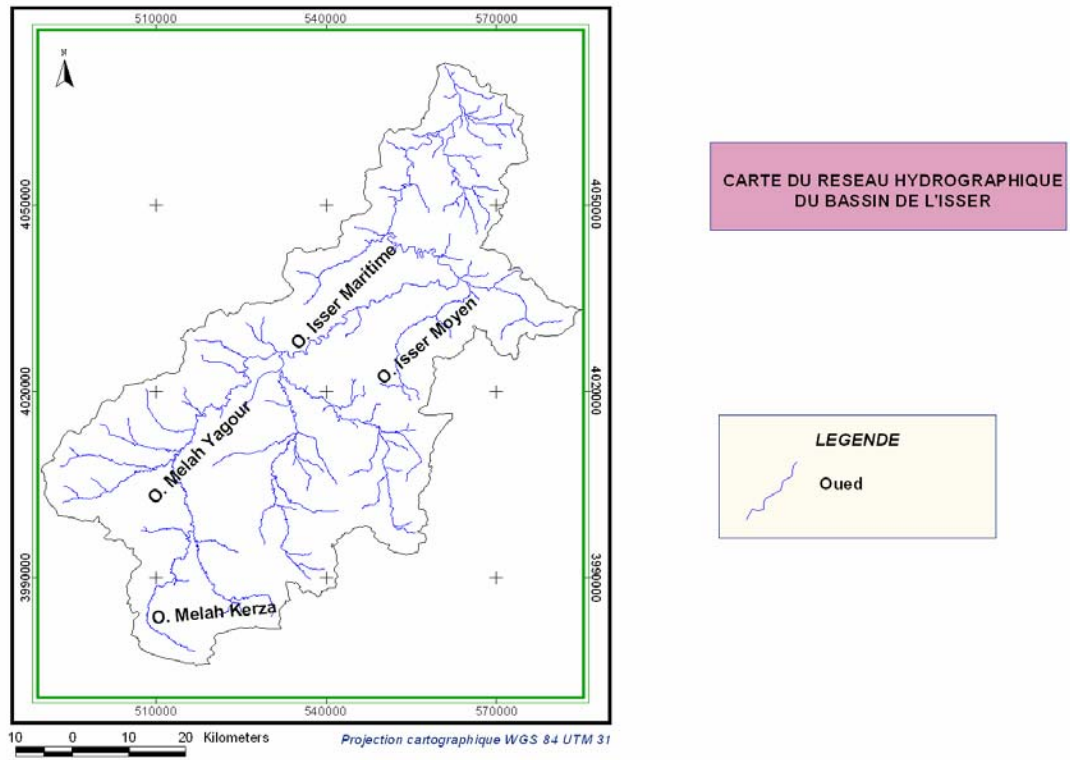


Figure 3.15 : Carte du réseau hydrographique du bassin de l'Isser

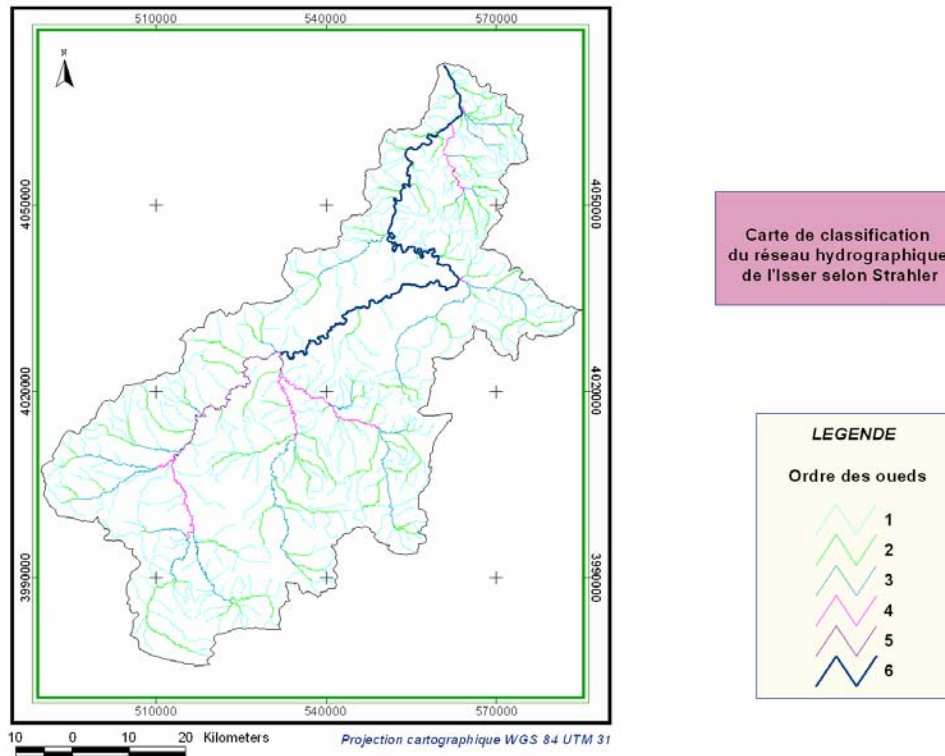


Figure 3.16 : Carte de classification du réseau hydrographique de l'Isser selon Strahler

### 3.2.1.7. Aperçu climatique

Le climat est de type méditerranéen semi-aride, les précipitations varient en fonction de l'altitude et l'éloignement du littoral, elles sont légèrement plus importantes dans la basse vallée.

La pluviométrie annuelle sur les différentes stations du bassin de l'Isser varie entre 600 et 900mm. Les mois les plus froids sont décembre, janvier et février. Les températures montent à partir du mois de mai. Ainsi on distingue la saison chaude et froide de l'année. Le mois le plus chaud est Août, avec un vent chaud et sec : le sirocco. La gelée blanche est un facteur limitant aussi important que le sirocco, surtout dans le domaine agronomique, elle varie entre 3 et 4 jours par an pour les stations de Thenia et Bordj-ménaïel. Les chutes de grêle sont plus importantes entre décembre et janvier.

### **3.3. Conclusion**

Le bassin de la Soummam est un bassin de forme allongée, ayant un temps de concentration assez long, il présente une dissymétrie vers les altitudes élevées. La majeure partie du bassin de la Soummam correspond aux chaînes de l'Atlas Tellien formées principalement par des marnes crétacées déposées dans le sillon tellien et charriées dans la moitié méridionale. Son réseau hydrographique est bien développé (ordre 7), avec un couvert végétal de type méditerranéen très varié.

Le bassin de l'Isser, moins étendue que celui de la Soummam occupe une superficie de 4150km<sup>2</sup>, son altitude maximale est de 1810m. Il contient cinq sous-bassins, dans la direction sud-ouest/nord-est. Le réseau hydrographique est bien développé (ordre 6). Les sols rencontrés sont des sols peu évolués à texture fine, les sols calcaires, les vertisols et les sols minéraux butés. Les nappes aquifères sont situées dans la vallée de l'oued Isser.



## Chapitre 4

# Les Systèmes d'Information Géographiques et leur application en hydrologie

### 4.1. Introduction

On trouve de nombreuses définitions pour le SIG qui véhiculent toutes des expressions communes touchant à la cartographie, aux bases de données et à l'analyse spatiale. Cette variété reflète la dynamique de cet outil et de son évolution. L'une de ces définitions a retenu notre attention pour sa clarté et sa généralité. C'est celle donnée en 1989 par la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection : « un SIG est un système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler et organiser, de gérer, de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées contribuant notamment à la gestion de l'espace ».

Le SIG s'avère un outil puissant au travers de sa capacité à représenter la réalité sous la forme de cartes thématiques par couche d'information (*layer* –distribution spatiale d'une catégorie d'entité paramétrable). Un SIG permet aussi de croiser les données de sources différentes (*overlay*). Une troisième propriété fondamentale est la possibilité de gérer une large base de données (SGBD).

Il ne faut pas réduire la compréhension d'un SIG à une simple interprétation des résultats obtenus à partir de données extraites par des requêtes préétablies. Chaque problème de gestion ou d'aménagement de territoire est un problème unique qu'il faut traiter individuellement.

Dans ce chapitre, nous exposons l'intérêt de l'utilisation des systèmes d'information géographiques, de nos jours, dans tous les domaines de la science notamment en hydrologie.

## 4.2. Mise en œuvre des SIG

Pour mettre en œuvre un SIG, il est nécessaire de suivre la démarche décrite par les étapes suivantes :

- définir l'objectif du projet de SIG ;
- acquérir les données pertinentes ;
- géoréférencer les données acquises ;
- traiter les données et interpréter les résultats ;
- établir le rapport final.

L'objectif d'un projet de SIG est lié à son domaine d'application, qui peut être : militaire, administratif (urbanisme, transport, télécommunication), économique (ressources naturelles, agriculture, etc.), d'éducation, de recherche (géologie, hydrologie, etc.).

L'acquisition des données est réalisée en fonction de cet objectif. Elle consiste à partir de données provenant de sources extérieures au SIG, à les transposer dans un format numérique compatible. Les principales sources de données sont les cartes thématiques classiques, l'imagerie satellitaire, les photogrammes, etc. Diverses méthodes de saisies des données sont pratiquées: codage manuel, digitalisation à l'aide d'un table à numériser ou par saisie directe à l'aide de la souris, vectorisation automatique d'images scannées à l'aide d'un logiciel adapté (par exemple, MapScan) et transfert des données provenant de sources informatiques distantes (Internet, par exemple).

L'étape de géoréférencement consiste à transformer les coordonnées intrinsèques d'un thème vectoriel (x, y) en coordonnées cartographiques (latitude, longitude). A l'issue de cette étape nous avons créé une première base de données. Les informations géographiques liées à la zone étudiée sont stockées non seulement sous forme de cartes thématiques, mais aussi sous formes des tableaux. Dans ces tableaux, ou table attributaire, on retrouve des informations géographiques (par exemple, coordonnées x, y, z) et attributives (par exemple : coefficients de rugosité).

L'analyse spatiale, qui recouvre l'étape suivante de traitement des données, est la discipline géomatique qui consiste à étudier et à traiter quantitativement et qualitativement les informations spatiales. L'objectif est la détermination de leur distribution dans l'espace et d'identifier de nouvelles informations pratiques. L'analyse spatiale se décline en deux directions : l'analyse *singulière* (appliquée à une seule couche thématique) et l'analyse *multiple* (croisement de plusieurs couches thématiques).

Dans le cas de l'analyse singulière, l'utilisateur peut réaliser les opérations suivantes : manipulations géométriques (changement d'échelle, correction de données, changement

de projection ou de coordonnées), mesurages (longueur, périmètre, aire), interrogations spatiales ou non spatiales (en fonction de l'attribut), modification des attributs. Un résultat particulièrement intéressant de l'analyse spatiale singulière est l'opération d'interpolation sur les données d'altitude permettant de construire le Modèle Numérique de Terrain (MNT, ou MDE pour Modèle Digital d'Élévation, ou MDA pour Modèle Digital d'Altitude).

Un MNT est une représentation de la topographie. Le support d'un tel modèle peut être une représentation Raster (division régulière de l'espace sous forme de mailles généralement carrées) ou vectoriel (set de points de mesure). Le MNT peut être utile non seulement pour la représentation du relief, mais aussi des applications en géologie, pédologie, hydrologie, science du sol, etc.

### **4.3. Généralités : Les systèmes d'informations**

Souvent lorsque l'information utile est dispersée entre plusieurs utilisateurs, son accès est rendu difficile, sinon impossible, sans une organisation minimale et sans l'aide d'un outil permettant de la rechercher : il s'agit du système d'information. La difficulté à rassembler l'information freine de manière générale son utilisation et parfois gêne l'obtention de résultats utilisant des éléments d'information disséminés auprès de plusieurs possesseurs. Car outre que la connaissance même de leur existence peut être à elle seule un problème, elle ne suffit pas et la localisation ou la recherche d'éléments d'information peuvent générer des difficultés quelquefois insurmontables ou trop onéreuses pour justifier leur utilisation.

Destinés à rassembler les informations et utilisés pour permettre leur diffusion, les systèmes d'informations sont devenus les outils indispensables à toute entité gérant de l'information. Cette information peut être financière, technique ou documentaire. Ces systèmes rassemblent et gèrent des masses importantes d'information et permettent d'avoir ainsi accès à cette dernière en retrouvant les renseignements cherchés ou en indiquant au minimum l'endroit ou le support les contenant. L'information disponible est alors valorisée car son organisation autorisera une consultation poussée, permettant la réalisation de produits à valeur ajoutée (analyses, calculs, références).

Ils sont en effet utilisés pour améliorer la connaissance ou le savoir d'une entité comme une entreprise, un laboratoire ou une bibliothèque. Ils peuvent par exemple aider à la prise de décision en fournissant à des outils de mesure l'information nécessaire pour décrire l'état d'une partie ou de la totalité de cette dernière (comme un bilan financier ou comptable). En permettant de rassembler les informations élémentaires, ils fournissent un outil de travail pouvant être partagé par l'ensemble des collaborateurs qui ont ainsi un

accès à la totalité de l'information et non plus uniquement à celle qu'ils possèdent ou celle dont ils connaissent l'existence.

Ils offrent la possibilité d'agréger les données afin de calculer des indicateurs globaux répondant aux besoins des décideurs qui doivent détenir des informations fiables, synthétisant les opérations élémentaires réalisées, afin d'estimer les évolutions et les capacités de l'entreprise. Ils permettent aussi de simuler des situations en calculant l'influence de l'évolution d'un ou de plusieurs paramètres sur les autres ou sur le bilan global. Ils mettent à disposition les données et les traitements associés permettant de réaliser des synthèses et des analyses variées. Les données sont souvent gérées au moyen de systèmes de gestion de bases de données (SGBD) qui assurent le stockage des données de toutes sortes, puis effectuent la recherche, l'extraction et la présentation des informations nécessaires aux traitements demandés par ailleurs.

La constitution d'un système d'information nécessite une réflexion approfondie afin de répondre le mieux possible aux attentes des futurs utilisateurs. C'est pour cette raison qu'il faut distinguer trois approches des systèmes d'information correspondant à trois niveaux de préoccupations.

Le premier niveau est appelé l'approche conceptuelle, le second l'approche logique et le troisième correspond à la réalisation concrète de ce dernier. **Le niveau conceptuel** précise les acteurs impliqués et les fonctions assurées par le système d'information ainsi que ses limites d'utilisation, c'est à dire les fonctions qu'il n'assure pas (Que veut-on faire ?). **Le niveau logique** du système d'information précise comment les fonctionnalités attendues sont réalisées : quelle est l'information nécessaire et quels traitements vont l'utiliser afin de réaliser les objectifs fixés (Comment va t on faire ?). La conception à ce niveau du système ne prend en compte que les fonctionnalités demandées indépendamment des moyens techniques utilisés pour sa réalisation. La dernière question est : Avec quoi réalise t on le système d'information ? Elle est destinée à préciser les outils utilisés et à estimer les développements à faire.

Les données seront organisées et rassemblées en plusieurs sous systèmes ayant chacun leurs caractéristiques techniques et physiques propres (livres, photos, fichiers, réseau). Les données informatiques sont souvent gérées grâce à des systèmes de gestion de bases de données et donc doivent être présentées sous une forme compatible. Cela nécessite une modélisation qui servira à leur description et permettra de connaître puis de retrouver tous les éléments utiles aux traitements sous une forme adaptée.

Cette modélisation servira à préciser les renseignements qui doivent être disponibles dans la description informatique d'un événement ou d'un objet réel. Dans les faits la

description consiste en une liste d'attributs prenant des valeurs normalisées traduisant sans ambiguïté une propriété. La description informatique doit être suffisamment complète pour permettre la réalisation des traitements et traduire la réalité.

#### **4.4. L'information géographique**

Les systèmes d'information ont été mis en œuvre historiquement pour gérer des informations de type documentaire ou de gestion. Les informations utilisées dans ces systèmes ne portaient pas d'informations sur la localisation des objets autres que des renseignements tels qu'une adresse et exceptionnellement un couple de coordonnées dans des champs attributaires. Les informations localisées disposant d'une composante géographique étaient représentées de manière visuelle sur des cartes ou sur des plans.

Les systèmes d'information utilisent les possibilités de traitements sur des éléments informatiques telles que chaînes de caractères ou valeurs numériques pour permettre des recherches ou des traitements sur des textes ou des valeurs. L'utilisation des propriétés géographiques (intersection, distance proximité, forme) demande une approche globale dans laquelle les propriétés sémantiques (traduites par des valeurs) sont utilisées conjointement avec des caractéristiques liées à la forme ou à la position des objets.

Avant l'apparition de SIG, les opérations nécessitant l'utilisation des fonctions de rapprochement géométrique ou de superposition de données étaient faites sur des supports papier : cartes ou plans par des opérateurs qui devaient en premier lieu interpréter la carte pour identifier les éléments utiles. Ces supports contiennent en général l'ensemble des éléments nécessaires à une approche correcte des problèmes. Mais la quantité d'informations disponibles sur un support papier est limitée par la nécessaire lisibilité du résultat et les fonctions de rapprochement topologique ou géométrique ne sont pas faciles à mettre en œuvre.

Les systèmes d'information géographique se sont constitués en permettant d'atteindre les objectifs de tout système d'information: rassembler, traiter et mettre à disposition de l'information. Mais ils ont aussi permis de travailler avec la composante géographique liée aux objets. Des techniques de visualisation et d'analyse ont été développées afin d'offrir de nouveaux services qui n'étaient pas réalisables avec des supports papier. L'information visuelle disponible sur les cartes et sur les plans a été complétée par des informations permettant d'évaluer concrètement des événements ou des situations.

Le système d'information géographique est donc avant tout un système d'information. Il met donc à disposition des utilisateurs des renseignements et offre l'ensemble des outils permettant leur gestion et leur visualisation. La différence fondamentale avec un système d'information au sens classique du terme réside dans le fait que les éléments de

la base sont dotés d'une composante géographique. Cette composante apporte des informations supplémentaires comme les relations de voisinage ou les indications de forme qu'il est difficile d'exploiter sans l'aide de logiciels performants, que par extension on nomme aussi SIG pour systèmes d'information géographique.

Ces logiciels possèdent des fonctionnalités permettant d'utiliser les informations supplémentaires fournies par la géométrie et la localisation qui sont utilisées pour la visualisation ou la recherche spatiale. Il faut ainsi distinguer ces logiciels des bases de connaissances du même nom SIG. Ces dernières correspondent à une notion semblable à celle des systèmes d'information, alors que les logiciels SIG sont à rapprocher des moteurs de SGBD. Les systèmes d'information géographiques peuvent être décrits selon les trois niveaux utilisés pour les systèmes d'information classiques : le niveau conceptuel (que veut-on faire ou que peut-on faire ?), le niveau logique (comment procède t on ?) et le niveau de réalisation (comment s'organise t on pour réaliser les fonctionnalités attendues ?).

La notion d'information géographique amène une composante supplémentaire dans l'information disponible, composante qui, pour être employée efficacement, demande des moyens spécifiques et importants en particulier pour visualiser le contenu du territoire et offrir ainsi une information visuelle globale. Outre les possibilités offertes par la présence d'information supplémentaire, les systèmes d'informations géographiques permettent de gérer des informations de manière classique. Les performances de ces systèmes viennent de leur capacité à mélanger des renseignements attributaires ou qualitatifs avec des données géographiques, permettant de répondre à des interrogations mêlant qualitatif, quantitatif et géométrie. Des analyses territoriales de très grande précision peuvent être réalisées en tenant compte de données liées à la géographie telles que des densités, des répartitions ou des longueurs et des distances.

## **4.5. Historique des SIG**

L'évolution et la diffusion des SIG dans la science et l'aménagement du territoire est à mettre en lien avec les développements de la technologie informatique, de la conscience environnementale et des nouvelles approches scientifiques transdisciplinaires, intégratrices. Depuis les années 70, et plus particulièrement depuis le sommet de ma terre à Rio de Janeiro en 1992, a lieu une prise de conscience des problèmes environnementaux à toutes les échelles.

Le développement des SIG est étroitement lié à celui de l'informatique. Maguire et al. (1991) distinguent trois périodes principales:

- fin des années 1950 – milieu des années 1970 : début de l'informatique, premières applications de cartographie automatique,
- milieu des années 1970 - début des années 1980 : diffusion des outils de cartographie automatique/SIG dans les organismes d'État (armée, cadastre, services topographiques.),
- depuis les années quatre-vingts : croissance du marché des logiciels, développements des applications sur PC, mise en réseau (bases de données distribuées, applications sur Internet).

Depuis quelques années, nous assistons à la démocratisation de l'usage des informations géographiques (cartographie sur Internet, calcul d'itinéraires, utilisation de solutions embarquées liées au GPS..).

## **4.6. Quelques concepts**

### **4.6.1. Les composantes du SIG**

Un SIG est constitué de 5 composants majeurs :

A. **Les logiciels** qui assurent les 5 fonctions suivantes (parfois regroupées sous le terme des '5A'):

- saisie des informations géographiques sous forme numérique (Acquisition)
- gestion de base de données (Archivage)
- manipulation et interrogation des données géographiques (Analyse)
- mise en forme et visualisation (Affichage)
- représentation du monde réel (Abstraction).

### **B. Les données :**

Les données sont certainement les composantes les plus importantes des SIG. Les données géographiques peuvent être, soit importées à partir de fichier, soit saisies par un opérateur.

### **C. Les matériels :**

Actuellement, le traitement des données à l'aide des logiciels ne peut se faire sans un ordinateur. En outre, pour faciliter la diffusion des résultats produits par un SIG, on utilise de plus en plus des systèmes client-serveur en intranet, extranet voire Internet.

### **D. Les savoir-faire :**

Tous les éléments décrits précédemment ne peuvent prendre vie sans une connaissance technique de ces derniers. Un SIG fait appel à divers savoir-faire et donc divers métiers qui peuvent être effectués par une ou plusieurs personnes. On retiendra notamment la nécessité d'avoir des compétences en analyse des données et des processus, en traitement statistique, en sémiologie graphique et cartographique et en traitement graphique.

### **E. Les utilisateurs :**

Comme tous les utilisateurs de SIG ne sont pas forcément des spécialistes, un SIG propose une série de boîte à outils que l'utilisateur assemble pour réaliser son projet. N'importe qui peut, un jour ou l'autre, être amené à utiliser un SIG. Cela dit, on ne s'improvise pas géomaticien : une bonne connaissance des données manipulées et de la nature des traitements effectués par les logiciels permet seule d'interpréter convenablement la qualité des résultats obtenus.

#### **4.6.2. Questions auxquelles peuvent répondre les SIG**

Un SIG doit répondre à 5 questions, quel que soit le domaine d'application :

- Où : où se situe le domaine d'étude et quelle est son étendue géographique ?
- Quoi : quels objets peut-on trouver sur l'espace étudié ?
- Comment : comment les objets sont répartis dans l'espace étudié, et quelles sont leurs relations ? C'est l'analyse spatiale.
- Quand : quel est l'âge d'un objet ou d'un phénomène ? C'est l'analyse temporelle.
- Et si : que se passerait-il s'il se produisait tel événement ?



### 4.6.3. Les données du SIG

Les données géographiques possèdent quatre composantes :

- les données géométriques renvoient à la forme et à la localisation des objets ou phénomènes,
- les données descriptives (ou attributaires) renvoient à l'ensemble des attributs descriptifs des objets et phénomènes à l'exception de la forme et de la localisation,
- les données graphiques renvoient aux paramètres d'affichage des objets (type de trait, couleur...),
- les métadonnées associées, c'est à dire les données sur les données (date d'acquisition, nom du propriétaire, méthodes d'acquisition...).

#### A. Les données attributaires

Il s'agit essentiellement de variables décrivant un objet géographique : nom d'une route, type d'un bâtiment, nombre d'habitants d'un immeuble, débit d'un cours d'eau, tension d'une ligne de transport d'énergie, type d'arbres dans un verger, etc. Les attributs ne sont pas *stricto sensu* des informations géographiques, mais contribuent à les qualifier. On peut également considérer que les données attributaires sont localisées par la géométrie de l'objet.

#### B. Les objets géographiques

Les objets géographiques sont organisés en couches. Généralement, une couche fait référence à un thème : par exemple, la couche des eaux superficielles référence l'ensemble des rivières. Trois types d'entités géographiques peuvent être représentés : le point *(x, y)* ou *ponctuel* ; la ligne  $((x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n))$  ou *linéaire* ; le polygone ou *surfaccique*.

Deux modes de représentations sont possibles :

- vectoriel (format vecteur) : les objets sont représentés par des points, des lignes, des polygones ou des polygones à trous ;
- matriciel (format raster) : il s'agit d'une image, d'un plan ou d'une photo numérisés et affichés dans le SIG en tant qu'image.

Un système de coordonnées terrestres (sphérique ou projectif) permet de référencer les objets dans l'espace et de positionner l'ensemble des objets les uns par rapport aux autres. Les objets sont généralement organisés en couches, chaque couche rassemblant l'ensemble des objets homogènes (bâti, rivières, voirie, parcelles, etc.).

### C. Relation Objets/Données attributaires

Un des avantages des SIG est que les relations entre les objets peuvent être calculées et donner naissance à des points d'intersection. C'est la topologie. Ceci permet d'éviter la répétition d'objets superposés. Une parcelle bordant une route aura les mêmes sommets que ceux définis pour la route.

### D. Les métadonnées

Les données que manipule un SIG sont issues de sources diverses. Une organisation qui se dote d'un tel système doit avoir à cœur de maîtriser ces sources, de façon à s'assurer :

- qu'elle est bien au fait de l'ensemble des couches de données disponibles dans l'organisation,
- qu'elle peut se fier aux résultats obtenus lors de leur utilisation,
- qu'elle en maîtrise la gestion interne,
- qu'elle en maîtrise les coûts d'acquisition et de mise à jour,
- qu'elle est en mesure, le cas échéant, de fournir tout ou partie de ses données à des tiers, en donnant une visibilité suffisante sur la qualité de la fourniture.

Pour toutes ces raisons, une source de données géographiques ne se limite pas uniquement à son contenu attributaire et géographique, mais est accompagnée d'informations caractérisant la source elle-même, soit encore de données sur les données : de métadonnées. Quelques exemples de métadonnées (parmi beaucoup d'autres) :

- Description générale : description et nature des données, système de projection et étendue géographique, organisme producteur
- Qualité des données : date de saisie ou de validité - si une donnée est ancienne par rapport aux évolutions des entités qu'elle représente, on peut toujours la faire intervenir dans des calculs, mais les résultats seront à interpréter avec prudence ; précision de la saisie - croiser des données de qualité centimétrique avec des données de qualité hectométrique ne donne jamais de résultat que d'une précision hectométrique !
- Gestion interne : responsable et localisation, date d'acquisition, fréquence de mise à jour et date de dernière mise à jour.

L'ensemble de ces informations doit pouvoir être facilement accessible et partageable par tous les acteurs intervenant à quelque niveau que ce soit dans le cycle de vie des données au sein de l'organisation. La définition d'un porte-feuille de métadonnée reste un enjeu

pour toute organisation qui fait de son SIG une pièce importante de son activité, et ce qu'elle soit fournisseur de données ou simple utilisatrice.

## 4.7. Les SIG en hydrologie

Les problématiques liées à l'hydrologie et à l'écoulement des eaux sont très complexes. En effet, elles intègrent un grand nombre de paramètres provenant de différents domaines interconnectés, et nécessitent parfois des séries de données étendues sur une échelle de temps conséquente. Lorsqu'on s'intéresse à l'ensemble d'un bassin versant, la quantité d'informations qui s'y rapportent devient gigantesque. Un outil SIG est une aide précieuse dans ce domaine. Il permet non seulement de conserver les données de manière rationnelle et de gérer les informations qui se réfèrent au bassin versant, mais surtout, il offre différentes fonctions qui seront d'une grande utilité pour ses utilisateurs.

### 4.7.1. Structure du SIG

La principale structure hydrologique qui apparaît dans le développement d'un tel SIG est évidemment le réseau hydrographique. Tout commence donc par la définition des différents cours d'eau et de leurs connexions (*réseau topologique*). Les cours d'eau eux-mêmes sont caractérisés selon les spécificités de leurs différents tronçons (*segmentation dynamique*). C'est à partir de la conception de ce «squelette» spatialisé que viennent se greffer toutes les informations supplémentaires, et que peut se développer le SIG.

Les informations contenues dans la base de données proviennent essentiellement des stations de mesures de débit sur le réseau, des stations de mesures pluviométriques, d'observations ou d'échantillonnages concernant la couverture végétale ou les types du sol. Dans tous ces cas, il s'agit d'informations ponctuelles, qu'il sera nécessaire de *régionaliser*, afin de disposer d'informations couvrant la totalité du bassin versant. Les bassins versants eux-mêmes sont déterminables par des algorithmes appartenant au domaine de l'*analyse spatiale*. Il convient de rappeler que les données brutes ou les résultats de régionalisation peuvent être de nature très différentes (informations de types vecteur, raster, séries temporelles, etc.).

### 4.7.2. Réseau topologique

La notion de topologie permet d'établir des relations de voisinage entre différents objets de l'espace, qu'ils soient ponctuels, linéaires ou surfaciques. Ce concept assure la cohérence des données géométriques et facilite leur utilisation, du fait qu'il élimine la redondance des objets, et autres types de défauts du type « spaghetti » (overshoot, sliver, ...). De plus, la topologie garantit la connectivité, facilitant ainsi les requêtes SQL relatives aux données.

Dans le cadre de l'hydrologie, la topologie facilite la représentation tout en conservant les relations indispensables entre les différents éléments caractéristiques du réseau hydrographique. La mise sur pied d'un tel outil permet premièrement de stocker les données acquises concernant les diverses formes géométriques (affluents, points de confluence, bassin versant, etc.) et les mesures topographiques (profils en travers et en long, MNA). Le réseau topologique et les objets spatiaux s'y rapportant représentent l'information spécifique à l'écoulement du cours d'eau.

Suivant les besoins de l'étude, une quantité d'informations complémentaires concernant les apports à l'écoulement principal peut être intégrée au système d'information. En effet, les infrastructures développées sur les cours d'eau comme les divers types de stations de surveillance (mesures de débit ou stations pluviométriques externes au réseau), ou les ouvrages ponctuels ayant un effet plus ou moins direct sur le cours d'eau se doivent d'être ajoutées afin que le système soit le plus représentatif du comportement général du bassin versant et de son réseau de drainage.

#### **4.7.3. Application d'Arcview en hydrologie**

Pour une application hydrologique, la saisie des données dans un SIG se déroule en plusieurs étapes :

- l'analyse de la morphologie du bassin versant (réseau hydrographique et limites des sous-bassins versants) à partir du MNT;
- la numérisation du couvert végétal et de la pédologie, par digitalisation à partir des cartes thématiques,
- la spatialisation des données des variables mesurées ;
- l'organisation et la gestion des fichiers relatifs aux couches d'informations.

Pour réaliser l'intégration spatiale des données des bassins de la Soummam et de l'Isser, nous avons choisi le SIG ArcView, outil puissant qui permet de visualiser, d'explorer et d'analyser les données géographiques. Il dispose d'extensions (programmes complémentaires) qui donnent accès à des fonctionnalités particulières pour géoréférencer les données géométriques, calculer le réseau hydrographique et les limites des bassins versants, les pentes, etc.

Les étapes de mise en œuvre d'un projet sous ArcView sont :

- l'acquisition des données ;
- le géoréférencement des thèmes acquis ;
- la création de cartes thématiques : topographie (courbes de niveau), pédologie, végétation
- la création du MNT ;
- le calcul du réseau hydrographique ;
- le calcul du bassin versant.

Pour créer le MNT, nous utilisons l'extension Spatial Analyst d'ArcView. Elle propose deux méthodes d'interpolation : « spline » ou « IDW ». La méthode Spline convient à un grand nombre d'applications et elle est particulièrement bien adaptée aux surfaces sur lesquelles il existe des variations peu brutales qu'il s'agisse, par exemple, d'une altitude ou de la profondeur d'une nappe phréatique, on obtient ainsi une courbe lissée

La méthode IDW (Inverse Distance Weighted) est appliquée à chaque point d'appui et a une influence locale qui diminue avec la distance. Les points qui se trouvent à proximité de la cellule de traitement ont plus de poids que ceux qui sont plus éloignés

Une fois le MNT créé, les fonctions d'analyse de surface permettent d'extraire de nouvelles informations : calcul de la pente (fonction qui permet de déterminer pour chaque maille la pente en fonction des mailles voisines), exposition (fonction qui permet de calculer pour chaque cellule la direction cardinale de l'exposition : 0° pour N, 90° pour E, etc.), l'ombrage (fonction qui permet de déterminer l'éclairage théorique d'une surface ; elle peut servir à déterminer la durée et l'intensité de l'ensoleillement). Les cartes réalisées sous ArcView sont présentées dans l'annexe 2.

## **4.8. Conclusion**

Les systèmes d'information géographiques sont devenus très performants grâce aux progrès effectués sur les logiciels et sur les matériels. Ils permettent de traiter rapidement et efficacement des volumes importants de données et souvent en temps réel. La mise à disposition de données à jour concourt à faciliter la mise en oeuvre d'applications utilisant l'Information Géographique et permet d'assurer des résultats de qualité.

Les dernières applications apparues sur le marché ne sont pas uniquement basées sur des systèmes d'informations géographiques et utilisent les moyens de communications basés sur les nouvelles technologies. Il n'en reste pas moins important de s'assurer de la qualité des données utilisées, de leur actualité et il est nécessaire de prévoir une organisation du travail compatible avec les exigences de qualité.

Le développement d'applications utilisant l'information géographique a pris un essor considérable grâce d'une part à la disponibilité de données de référence et d'autre part aux performances des systèmes informatiques. Grâce à cet essor, les systèmes d'information géographiques prennent une place de plus en plus importante dans les systèmes d'information globaux et sont de plus en plus présents dans de nombreux métiers. Quelquefois l'information géographique est occultée bien qu'indispensable comme cela est le cas de recherche de proximité basée sur l'adresse postale ou sur les toponymes.

Les méthodes de diffusion et de stockage évoluent elles aussi rapidement et l'apparition de bases de données réparties modifient les habitudes, les méthodes et les organisations et permet une prise de conscience de la nécessité d'avoir recours à de tels systèmes.

## Chapitre 5

# Application du modèle et optimisation des paramètres de calage

### 5.1. Introduction

Les modèles hydrologiques pluie-débit ne peuvent être testés ni fonctionner sans l'apport de données hydrométéorologiques, à savoir les données pluviométriques et d'évapotranspiration comme entrées du modèle et les données hydrométriques comme sorties de ce dernier (pour la période de calage).

L'optimisation des paramètres de systèmes non-linéaires que sont les modèles pluie-débit est une étape délicate et certains auteurs s'accordent pour dire que la qualité des paramètres d'un modèle dépend notamment de la puissance et de la robustesse de l'algorithme utilisé (Duan et al., 1992). Cette phase d'optimisation n'est cependant pas un problème hydrologique proprement dit, mais plutôt un corollaire mathématique de la modélisation lié à la nature et à la complexité intrinsèque du modèle (structure et nombre de paramètres).

Néanmoins, la complexité de certains modèles pluie-débit a conduit au développement de méthodes d'optimisation de plus en plus sophistiquées, destinées à pallier les défaillances de méthodes traditionnelles d'optimisation.

Ainsi nous nous proposons dans ce chapitre, de donner un aperçu des stations de mesure des données utilisées dans le modèle GR2M, les étapes suivies pour l'optimisation des paramètres de calage de ce modèle et enfin les résultats obtenus dans sa validation.

### 5.2. Description de l'échantillon de données

Le modèle retenu GR2M a été appliqué sur les sous bassins versants de la Soummam et de l'Isser. Nous avons choisi, pour l'application du modèle les bassins qui

présentent des séries d'observation, de pluie et de débit, assez longues (supérieur à 10 ans), les bassins ayant des courtes durées d'observation ont été éliminés. Le tableau suivant donne les sous-bassins retenus et leurs caractéristiques :

Tableau 5.1 : Caractéristiques des sous-bassins retenus

code	S (km <sup>2</sup> )	P (km)	ETP (mm)	P (mm)	Q (hm <sup>3</sup> )
90101	665	138	1475	360	20,3
90305	273	78	1480	461	12,3
90309	73	37	1394	470	7,6
90408	2570	470	1472	380	171,1
90501	3615	650	1455	735	284,9
150106	840	192	1435	470	63,8
150601	105	50	1240	390	11,6
150702	2350	270	1385	450	12,0
150901	4050	700	1502	420	166,8
151001	8420	1600	1420	490	578,1

S, P, ETP, P sont respectivement superficie, périmètre, évapotranspiration moyenne annuelle, pluie moyenne annuelle et apport moyen annuel de chaque sous bassin.

### 5.2.1. Les données pluviométriques

La précipitation est la source principale de notre approvisionnement en eau, les relevés de précipitation sont donc à la base de nombreuses études et projets qui ont trait aux approvisionnements en eau, aux inondations, à la sécheresse, à l'irrigation et aux structures de contrôle ainsi qu'aux études de modélisation hydrologique. La précipitation comprend toutes les formes d'humidité tombant de l'atmosphère à la surface de la terre. Sa source primaire est la vapeur d'eau présentée sous forme de vapeur, de liquide et de solide. Elle s'accroît par l'évaporation et la transpiration et elle décroît avec la précipitation. Il existe trois grandes catégories de précipitations; les précipitations orographiques, les précipitations convectives et les précipitations frontales ou cycloniques.

Une étude faite par Allis, et al, (1963) a démontré que "la vraie précipitation pour une région donnée est inconnue". Ceci est sans doute due à l'erreur instrumentale des pluviomètres et à l'hétérogénéité naturelle de la précipitation. Les erreurs commises dans la mesure des pluies sont généralement dues : au déplacement du pluviomètre, changement du type de pluviomètre, l'inclinaison du pluviomètre, l'évaporation et l'effet du vent. Lorsque la précipitation est relativement uniforme et que les mesures sont représentatives, la moyenne arithmétique de plusieurs valeurs peut fournir un estimé satisfaisant de la quantité de pluie moyenne d'une région, ainsi que par la méthode des polygones de Thiessen et celle des isohyètes (D.M.Gray, 1972).



Les précipitations journalières, mensuelles ou annuelles sont généralement exprimées en millimètre par jour, par mois ou par an, réservant généralement l'expression en intensité (mm/h) à des intervalles de temps plus courts. Dans notre cas, la pluviométrie est exprimée en mm/mois, elle représente une hauteur d'eau tombée sur le bassin versant considéré et intégrant la distribution spatio-temporelle.

Les bassins de la Soummam et de l'Isser contiennent un grand nombre de stations pluviométriques répartis uniformément sur les deux bassins, cependant ces stations ne sont pas toutes continues, elles ont subi des périodes d'arrêt plus ou moins longues. Pour cela, nous avons retenu, pour notre étude de modélisation, les stations ayant des durées d'observation les plus longues possibles. Les tableaux (5.2) et (5.3) présentent les caractéristiques des stations pluviométriques retenues.

Tableau 5.2 : Caractéristiques des stations pluviométriques retenues du bassin de la Soummam

Code	Nom de la station	Période d'observation	Coordonnées Lambert		Altitude Z (m)
			X (Km)	Y (Km)	
150101	Sour-el-Ghozlane	1973-2002	589.30	317.15	705
150103	El-hachimia	1970-2002	587.50	332.90	682
150608	Bouira Coligy	1969-1993	732.00	326.65	1017
150610	Fermatou	1969-2000	742.00	328.60	1040
150614	Tixter	1968-2000	715.00	308.25	956
150707	Bir Kasdali	1967-2000	709.50	318.40	1040
150902	Guelaa	1968-1993	669.05	334.70	1060
151004	One Maouche Ahmed	1968-1988/1991-2000	692.75	373.40	105
151007	Tifra	1968-2000	679.00	376.00	450

Tableau 5.3 : Caractéristiques des stations pluviométriques retenues du bassin de l'Isser

Code	Nom de la station	Période d'observation	Coordonnées Lambert		Altitude Z (m)
			X (Km)	Y (Km)	
09-01-04	Souaghi	1973-1998	548,99	312,40	810
09-03-01	Djouab	1969-2001	566,95	315,55	825
09-03-02	Beni Slimane	1967-1998	554,70	326,00	600
09-03-04	Pont De La Traille	1968-1998	559,15	343,00	370
09-04-01	Khabouzia	1968-2001	579,15	334,35	720
09-04-02	Souk El Khemis	1968-2001	584,00	343,40	782
09-04-03	Djebahia	1967-2001	594,80	353,45	520
09-04-06	Tazerout	1968-2001	571,10	361,65	450
09-04-13	Ouled Touati (Mihoub Zbarbar)	1968-1996	576,65	347,50	831
09-04-19	Bsibsa	1972-2001	570,25	354,50	820
09-05-02	Lakhdaria Gorges	1967-2001	579,00	369,50	50
09-05-03	Ouled Bouhaddada	1968-2001	574,55	372,30	425
09-05-06	Tizi Ghenif	1967-2001	596,30	366,10	415
09-05-12	Chabet El Ameur	1972-2001	588,85	371,40	260

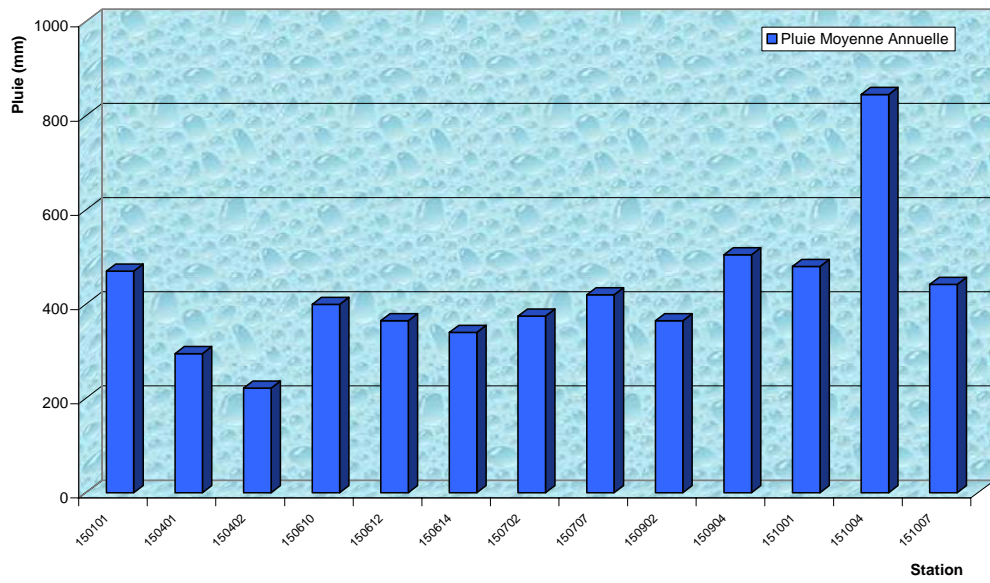


Figure 5.1. : Pluviométrie moyenne annuelle du bassin de la Soummam

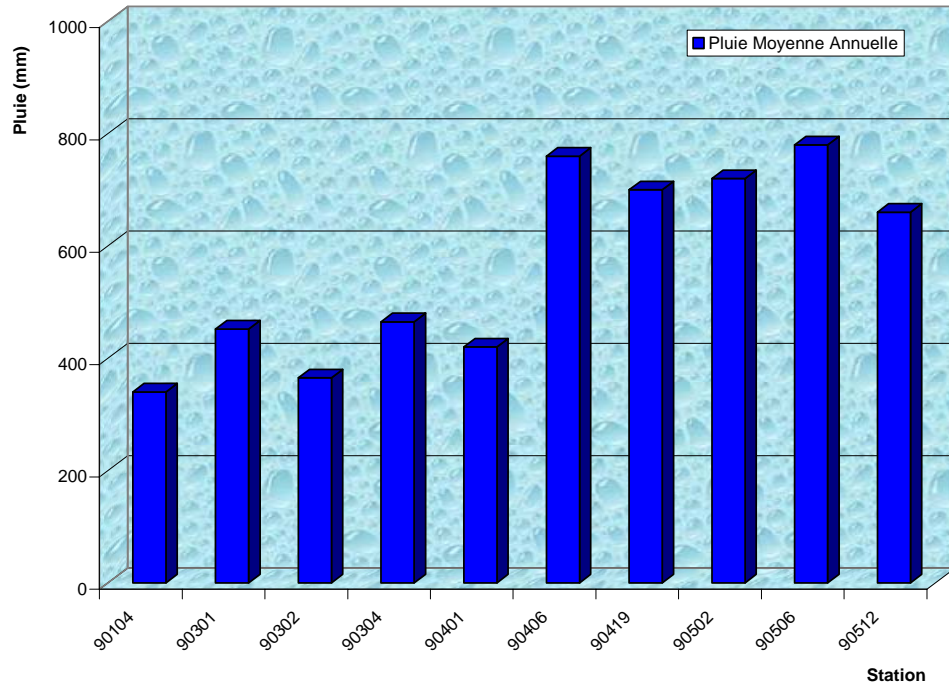


Figure 5.2. : Pluviométrie moyenne annuelle du bassin de l'Isser

### 5.2.2. L'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration, notée ETP, implique l'eau utilisée par les procédés d'évaporation et de transpiration, il est évident que plusieurs facteurs, notamment les facteurs climatiques qui influent l'évaporation affectent aussi l'évapotranspiration. Parmi ces facteurs, l'intensité et la durée de la radiation solaire, les conditions du vent, l'humidité relative, le couvert nuageux, la pression atmosphérique et d'autres.

Elle est estimée par une mesure par évaporomètre ou déduite par des formules empiriques telles que celles de Penman, Turc, Thorntwaite ...etc. L'unité de l'évapotranspiration est le millimètre sur le pas de temps désiré (mois dans notre cas). Les données de l'ETP, utilisées dans notre étude, ont été extraites de la carte d'ETP du nord de l'Algérie réalisée par le service Hydrologie de l'ANRH.

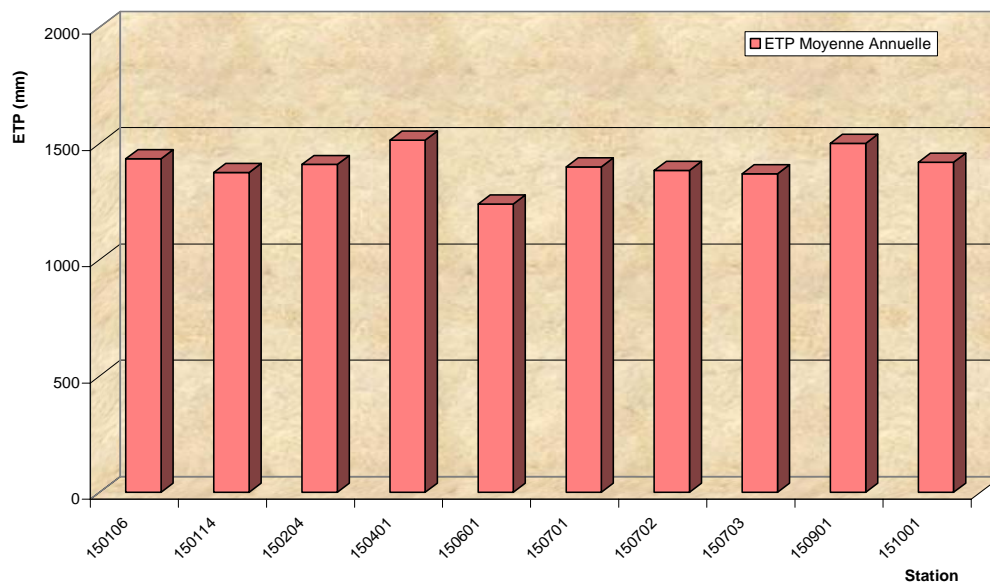


Figure 5.3. : Evapotranspiration moyenne annuelle du bassin de la Soummam

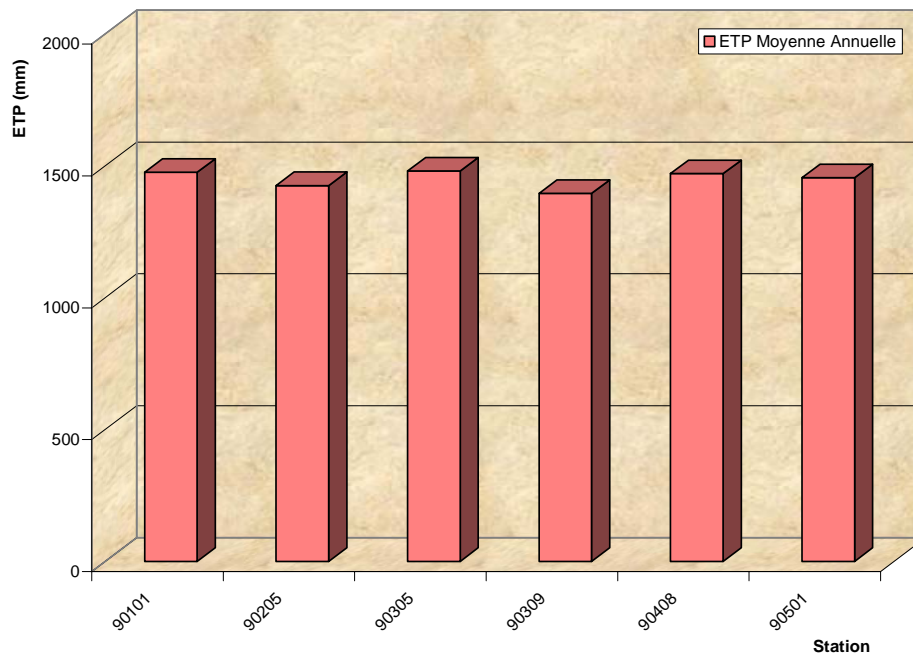


Figure 5.4. : Evapotranspiration moyenne annuelle du bassin de l'Isser

### 5.2.3. Les données hydrométriques

Suite à une pluie tombée sur le bassin versant, tout un mécanisme complexe d'interaction de phénomènes hydrologiques et climatologiques se met en œuvre. Il se traduit par une circulation, directe ou indirecte, de l'eau à travers le sol ou le sous-sol en passant par les cours d'eau secondaires puis principaux, et finissant par l'exutoire du bassin versant.

A l'échelle globale du bassin versant, le débit à l'exutoire traduit la réaction de tout le bassin suite à une pluie. Il est mesuré par différentes techniques hydrométriques, par exemple : le jaugeage par moulinet ou le jaugeage chimique. Ce débit est exprimé en mètre cube par seconde ( $m^3/s$ ). Dans notre cas, et pour les nécessités de calcul du modèle, les débits sont exprimés en mm d'eau par mois (apports). Les stations choisies pour l'application du modèle ont été jugées appréciables, par rapport à celles éliminées, du fait de leurs séries d'observation plus ou moins satisfaisantes (supérieures à huit ans). Ces stations et leurs caractéristiques sont données dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 5.4 : Caractéristiques des stations hydrométriques retenues du bassin de la Soummam

Code	Nom de la station	Période d'observation	Oued	Superficie du BV (Km <sup>2</sup> )
150106	Tilesdit	1963 - 1985	Ed-dous	840
150601	Fermatou	1970 - 1996	Boussellam	105
150702	Magraoua	1980 - 1987	Boussellam	2350
150901	Sidi Yahia	1971 - 1996	Boussellam	4050
151001	Sidi-Aich	1958 - 1986	Soummam	8420

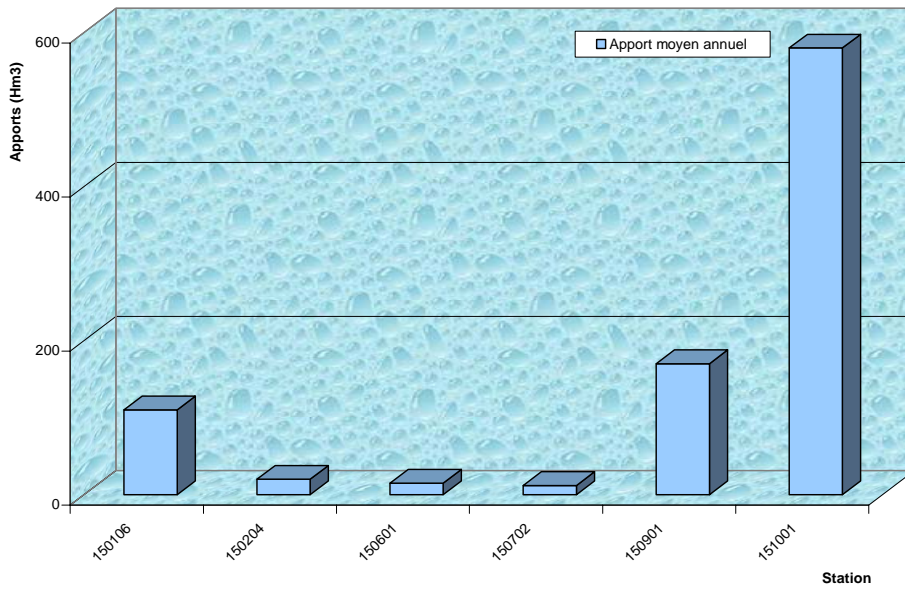


Figure 5.5. : Apport moyen annuel du bassin de la Soummam

Tableau 5.5 : Caractéristiques des stations hydrométriques retenues du bassin de l'Isser

Code	Nom de la station	Période d'observation	Oued	Superficie du BV (Km <sup>2</sup> )
090101	Mezahim	1973 - 1984	Mellah Ouest	665
090305	Beni-Slimane	1973 - 1996	Mellah Est	273
090309	Dechemia	1972 - 1984	Zeroua	73
090408	Latraille	1968 - 1984	Isser	2570
090501	Lakhdaria	1965 - 1996	Isser	3615

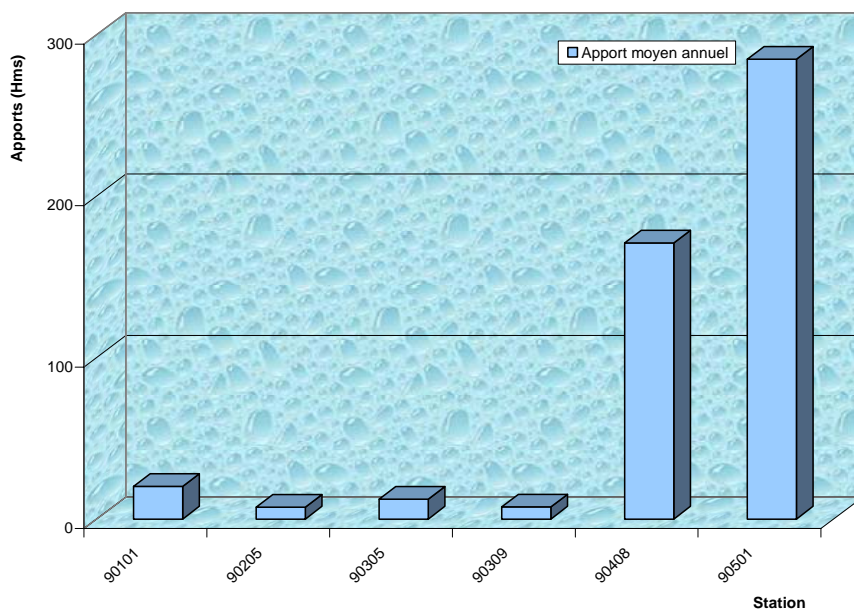


Figure 5.6. : Apport moyen annuel du bassin de l'Isser

### 5.3. Optimisation des paramètres de calage du modèle

L'optimisation des paramètres d'un modèle pluie-débit a pour but de trouver le jeu de paramètres qui rapproche le plus possible le comportement du modèle de celui du bassin modélisé, la similitude des comportements étant qualifiée par un critère (fonction objectif) servant à l'optimisation des paramètres et mesurant ce degré de similitude.

Le calage demande donc le choix à la fois d'un critère de qualité, d'une méthode pour identifier les paramètres, ainsi que de séries de données destinées à fournir l'information nécessaire au calage (Sorooshian et Gupta, 1985). Cette phase de calage contribue également à compenser les erreurs internes ou imprécisions du modèle et les erreurs généralement contenues dans les données d'entrée. C'est une phase délicate, souvent plus délicate que le modèle a un nombre élevé de paramètres. Avec l'amélioration des moyens de calcul, on opte de plus en plus pour des méthodes automatiques de calage, par opposition à des techniques manuelles utilisant généralement des critères graphiques.

Le modèle GR2M a été programmé sur une feuille Excel comme indique la figure (5.7). Nous avons divisé les séries d'observation en deux sous-périodes, l'une pour le calage du modèle et l'autre pour la validation de ce dernier, tout en tenant à garder une période commune entre les précipitations et les apports. Les paramètres du modèle sont optimisés à l'aide de l'outil 'SOLVEUR' du logiciel Excel jusqu'à obtention d'une valeur de Nash proche de 100% (voir chapitre 2) et d'un meilleur ajustement entre les débits observés et les débits calculés par le modèle.

### 5.4. Critères de calage

On distingue deux types de critères d'évaluation des performances d'un modèle hydrologique. Les critères qualitatifs qui font appel à des évaluations numériques et les critères qualitatifs, eux, s'appuient généralement sur des observations graphiques (Perrin, 2000).

Certains auteurs, notamment Weglarczyk (1998), ont souligné qu'il n'existe pas de critère d'évaluation universel permettant de juger de la qualité d'un ajustement d'un modèle hydrologique. Ceci provient du fait que les gammes de variation des événements hydrologiques sur un bassin sont souvent assez étendues et que chaque classe de débit ne présente pas le même intérêt pour l'utilisateur du modèle. Au même titre que le choix de la forme d'une fonction objectif pour le calage du modèle, celui de critères quantitatifs d'évaluation reste lié aux objectifs de l'utilisateur (prévision des crues, simulation des étiages, gestion de la ressource en eau, etc.). Ici dans notre travail, nous avons choisi de vérifier les deux critères (résultats numériques et graphiques)

a) Analyse des résultats numériques ; pour chacune des stations hydrométriques suscitées, on compare les apports mensuels observés aux calculés et les apports annuels observés aux calculés par le modèle, et ceci en calculant les coefficients suivants :

- Le coefficient de corrélation, donné par :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{ci} - \bar{Q}_{ci})(Q_{oi} - \bar{Q}_{oi})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{ci} - \bar{Q}_{ci})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_{oi})^2}} \quad \text{Eq. (5.1)}$$

Où

$Q_{oi}$ : débit observé du mois i

$Q_{ci}$ : débit calculé par le modèle du mois i

$\bar{Q}_{ci}$  et  $\bar{Q}_{oi}$ : moyennes respectives des débits calculés et observés sur les n mois

- Le rapport des moyennes observées et calculées par le modèle,  $Q_{obs}/Q_{calc}$   
Si cette quantité est proche de 1, la simulation est bonne

- Le rapport des écarts types observés et calculés, défini par :

$$\frac{S_{obs}}{S_{calc}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_{oi})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{ci} - \bar{Q}_{ci})^2}} \quad \text{Eq. (5.2)}$$

Si le rapport  $S_{obs}/S_{calc}$  est proche de l'unité, la simulation est bonne

b) Analyse des résultats graphiques ; les graphiques des apports d'eau mensuels nous permettent de vérifier le synchronisme entre les lames d'eau observées et calculées par le modèle.

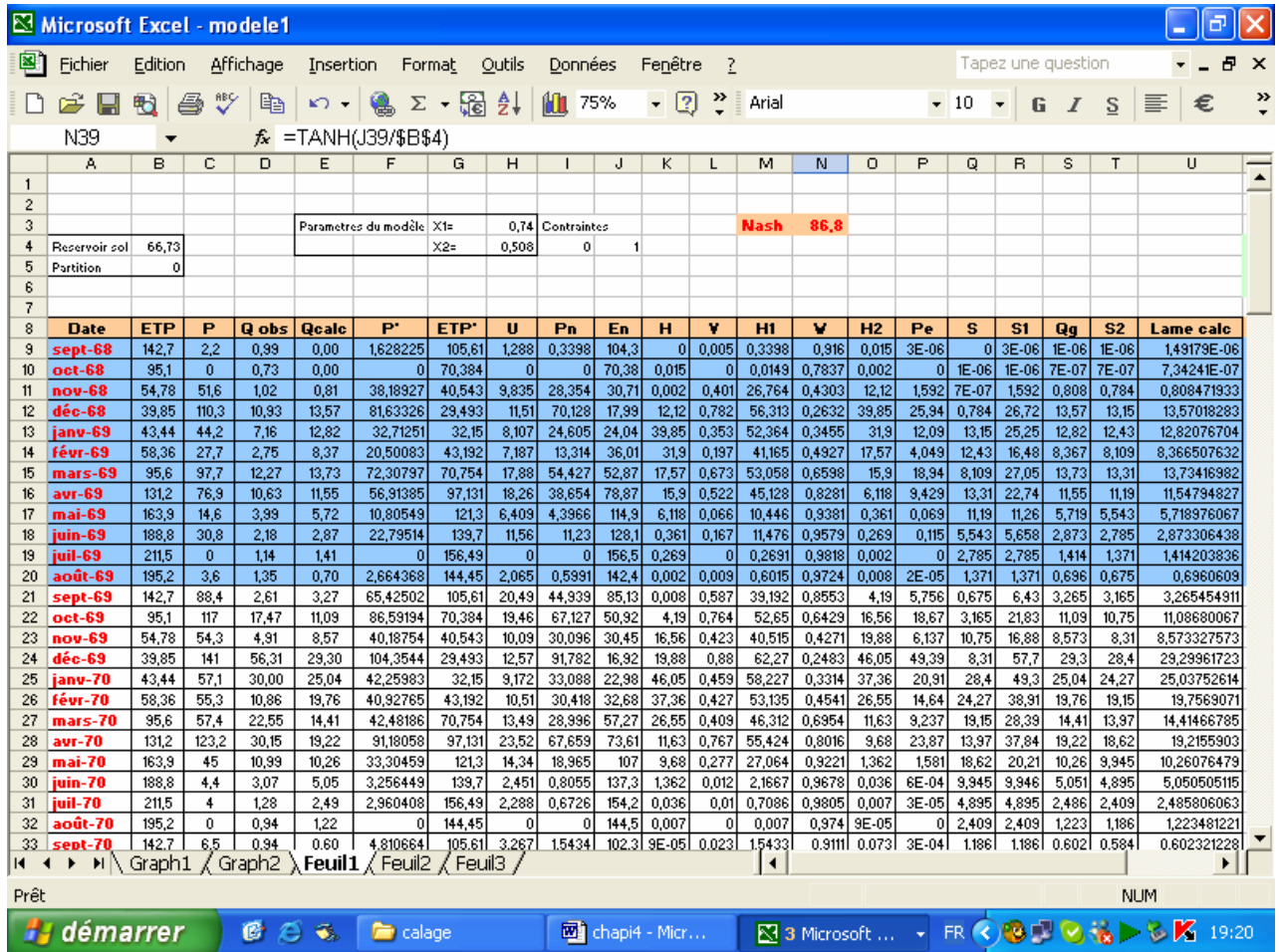


Figure 5.7 : Feuille Excel du modèle GR2M

### 5.5. Résultats et interprétation

Le calage des deux paramètres  $X_1$  et  $X_2$  uniquement, a donné des valeurs de Nash faibles ( $14 \% < \text{Nash} < 85\%$ ), et lorsqu'on a calé le paramètre A (voir chapitre 2), qui représente la capacité de remplissage maximale du réservoir sol du modèle GR2M, avec les deux paramètres  $X_1$  et  $X_2$ , nous avons obtenu des valeurs de Nash plus acceptables ( $61\% < \text{Nash} < 88\%$  au calage et  $30\% < \text{Nash} < 71\%$  à la validation). Ce qui nous a incité à caler le modèle avec les trois paramètres A,  $X_1$  et  $X_2$ . Le tableau suivant donne les paramètres obtenus après optimisation.



Tableau 5.6 : Paramètres optimisés du modèle GR2M

code	période-calage	période-contrôle	$X_1$	$X_2$	A	Nash calage (%)	Nash validation (%)
90101	73 / 79	80 / 84	0,50	0,28	22,15	63,19	36,79
90305	73 / 80	85 / 96	1,00	0,42	92,63	65,08	58,55
90309	73 / 78	79 / 84	0,87	0,56	95,93	66,96	60,43
90408	69 / 76	77 / 84	0,43	0,44	21,43	86,44	57,98
90501	69 / 76	82 / 89	0,44	0,72	106,91	87,16	70,54
150106	70 / 75	75 / 83	1,00	0,49	38,35	75,37	70,64
150601	70 / 76	77 / 84	1,00	0,46	32,03	61,54	53,28
150702	80 / 86	87 / 93	0,39	0,62	56,61	70,89	29,91
150901	80 / 86	87 / 97	0,47	0,44	18,01	78,50	34,71
151001	68 / 73	74 / 79	0,74	0,51	66,73	86,76	55,41

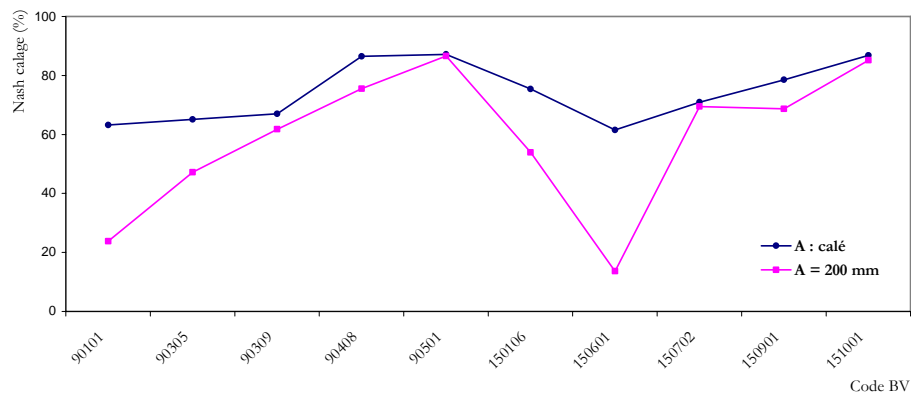


Figure 5.8 : Gain obtenu en calant le paramètre A en calage

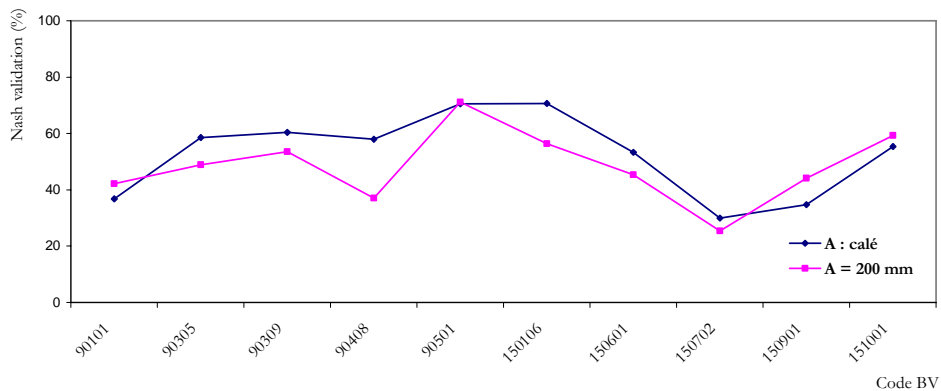


Figure 5.9 : Gain obtenu en calant le paramètre A en validation

Nous avons remarqué, dans l'étape de l'optimisation des paramètres du modèle, que les valeurs de Nash sont plus importantes (plus satisfaisantes) en calage qu'en validation, comme le montre la figure (5.10).

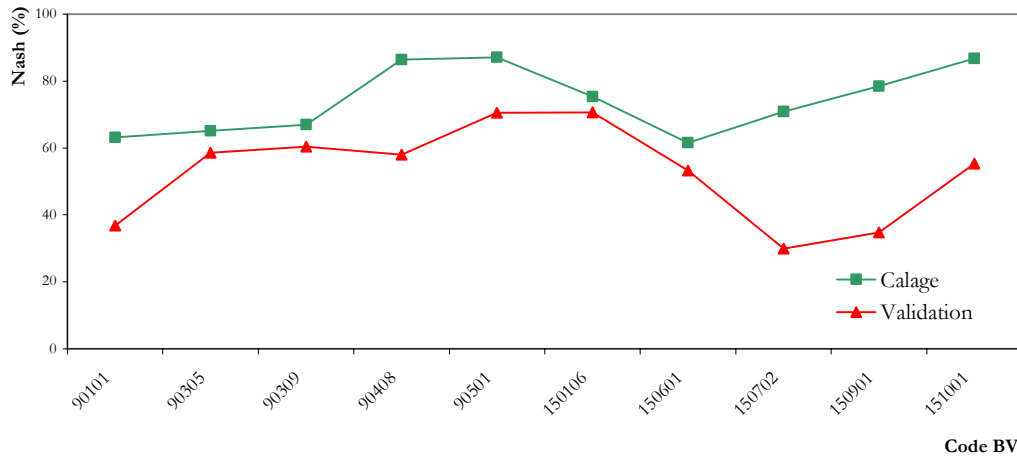


Figure 5.10 : Baisse du critère de Nash de la période de calage à la validation

### 5.5.1. Présentation des résultats numériques

Les résultats numériques obtenus, dans la phase calage du modèle GR2M, pour les pas de temps mensuel et annuel sont présentés dans les tableaux (5.7) et (5.8).

Tableau 5.7 : Résultats de calage en mensuel (mm)

Code station	Nom de la station	Moyennes			Ecart-types			Coefficient de corrélation R (%)
		$Q_{obs}$	$Q_{calc}$	$Q_{ob}/Q_{cal}$	$S_{obs}$	$S_{calc}$	$S_{obs}/S_{calc}$	
90101	Mezahim	2.76	2.48	1.11	3.15	2.13	1.48	73.0
90305	Beni-Slimane	4.57	3.85	1.18	5.91	3.82	1.55	74.0
90309	Dechemia	6.79	5.89	1.15	10.77	8.02	1.34	80.0
90408	Latraille	6.86	6.51	1.05	10.27	9.12	1.13	93.2
90501	Lakhdaria	10.87	10.24	1.06	18.99	17.02	1.12	93.7
150106	Tilesdit	16.73	12.07	1.38	28.7	16.36	1.75	82.7
150601	Fermatou	10.55	7.60	1.39	16.70	8.84	1.88	65.7
150702	Magraoua	2.41	2.01	1.20	4.39	2.84	1.55	71.8
150901	Sidi Yahia	5.24	4.82	1.08	7.24	5.85	1.24	76.7
151001	Sidi-Aich	11.35	10.85	1.04	13.81	12.71	1.08	91.3

Tableau 5.8 : Résultats de calage en annuel (mm)

Code station	Nom de la station	Moyennes			Ecart-types			Coefficient de corrélation R (%)
		$Q_{obs}$	$Q_{calc}$	$Q_{o}/Q_c$	$S_{obs}$	$S_{calc}$	$S_{obs}/S_{calc}$	
90101	Mezahim	33.11	29.8	1.11	15.88	15.44	1.03	86.9
90305	Beni-Slimane	54.84	46.22	1.19	23.91	18.90	1.26	68.0
90309	Dechemia	81.42	70.63	1.15	33.60	40.89	0.82	98.0
90408	Latraille	82.36	78.14	1.05	56.44	53.20	1.06	92.0
90501	Lakhdaria	130.49	122.86	1.06	85.77	72.74	1.18	98.0
150106	Tilesdit	200.73	144.79	1.39	130.25	96.39	1.35	99.8
150601	Fermatou	126.62	91.17	1.39	62.64	48.17	1.30	49.1
150702	Magraoua	28.89	24.14	1.20	18.98	10.54	1.80	49.0
150901	Sidi Yahia	62.93	57.88	1.09	22.00	24.16	0.91	55.5
151001	Sidi-Aich	136.15	130.25	1.05	49.66	45.16	1.10	91.1

De même pour la validation du modèle GR2M, les résultats sont donnés dans les tableaux (5.9) et (5.10).

Tableau 5.9 : Résultats de validation en mensuel (mm)

Code station	Nom de la station	Moyennes			Ecart-types			Coefficient de corrélation R (%)
		$Q_{obs}$	$Q_{calc}$	$Q_o/Q_{cal}$	$S_{obs}$	$S_{calc}$	$S_{obs}/S_{calc}$	
90101	Mezahim	2.03	2.98	0.68	2.00	3.47	0.58	85.5
90305	Beni-Slimane	3.36	2.82	1.19	5.89	4.11	1.44	76.0
90309	Dechemia	8.17	6.98	1.17	11.47	8.87	1.29	75.0
90408	Latraille	3.29	2.73	1.21	4.42	3.35	1.32	64.0
90501	Lakhdaria	4.05	4.70	0.86	7.49	8.25	0.91	90.5
150106	Tilesdit	8.04	8.13	0.99	14.12	10.33	1.37	73.8
150601	Fermatou	10.81	9.88	1.09	26.12	11.91	2.19	60.4
150702	Magraoua	0.32	0.41	0.77	0.53	0.61	0.88	55.0
150901	Sidi Yahia	1.79	2.90	0.62	2.38	4.09	0.58	81.3
151001	Sidi-Aich	3.15	3.52	0.90	4.02	4.40	0.91	73.0

Tableau 5.10 : Résultats de validation en annuel (mm)

Code station	Nom de la station	Moyennes			Ecart-types			Coefficient de corrélation R (%)
		$Q_{obs}$	$Q_{calc}$	$Q_o/Q_c$	$S_{obs}$	$S_{calc}$	$S_{obs}/S_{calc}$	
90101	Mezahim	24.33	35.79	0.68	10.22	14.46	0.71	98.4
90305	Beni-Slimane	40.37	33.87	1.19	27.41	24.26	1.13	76.8
90309	Dechemia	98.06	83.75	1.17	38.62	19.56	1.97	87.1
90408	Latraille	39.51	32.75	1.21	17.67	14.23	1.24	22.1
90501	Lakhdaria	48.60	56.45	0.86	29.12	32.43	0.90	83.8
150106	Tilesdit	96.50	97.54	0.99	34.32	37.73	0.91	56.7
150601	Fermatou	129.67	118.58	1.09	114.64	68.80	1.67	74.3
150702	Magraoua	3.80	4.96	0.77	2.06	3.98	0.52	71.2
150901	Sidi Yahia	21.47	34.80	0.62	12.33	21.88	0.56	78.8
151001	Sidi-Aich	37.83	42.23	0.90	22.29	28.59	0.78	70.5

### 5.5.2. Présentation des résultats graphiques

Les lames d'eau calculées sont comparées aux lames d'eau observées -pour toutes les stations hydrométriques retenues, en calage et en validation, et pour les mêmes périodes de simulation présentées dans le tableau (4.6). Les graphiques réalisés sont donnés ci-dessous. Les droites et les coefficients de corrélation entre les débits observés et calculés par le modèle GR2M sont donnés dans l'annexe 1.1.

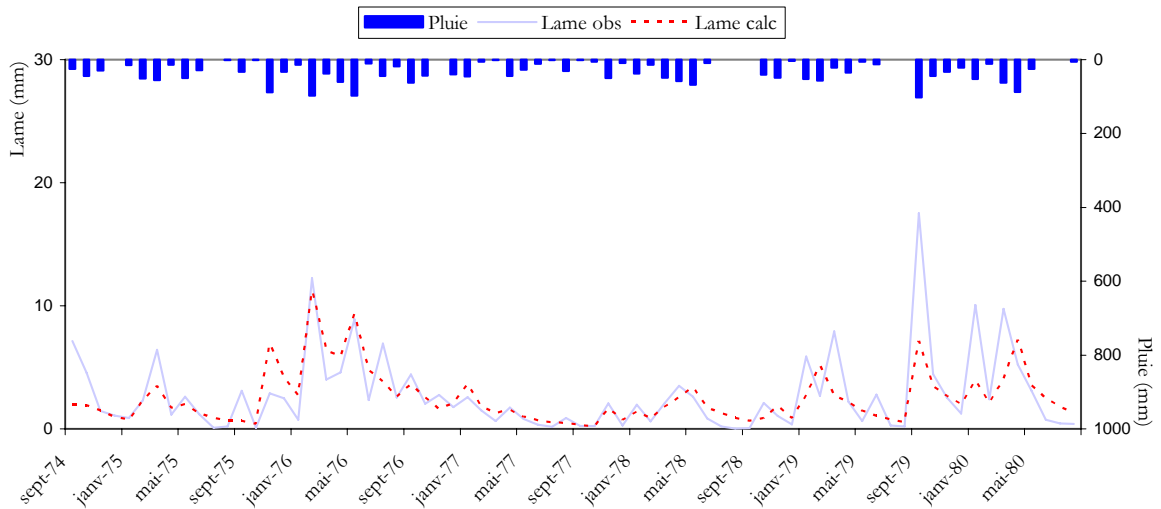


Figure 5.11. : Calibration du modèle GR2M sur les données de la station 090101

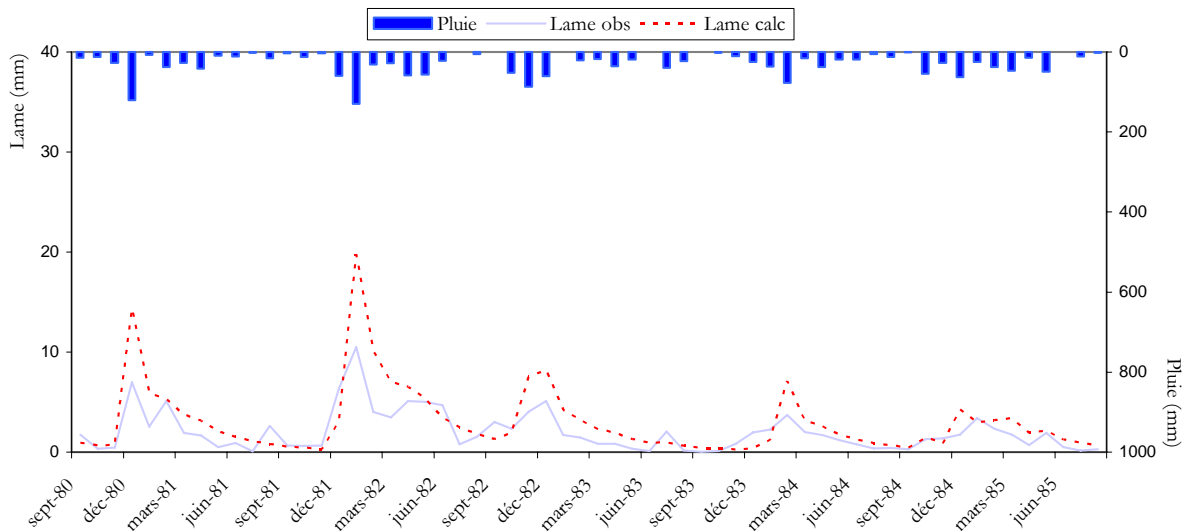


Figure 5.12. : Validation du modèle GR2M sur les données de la station 090101

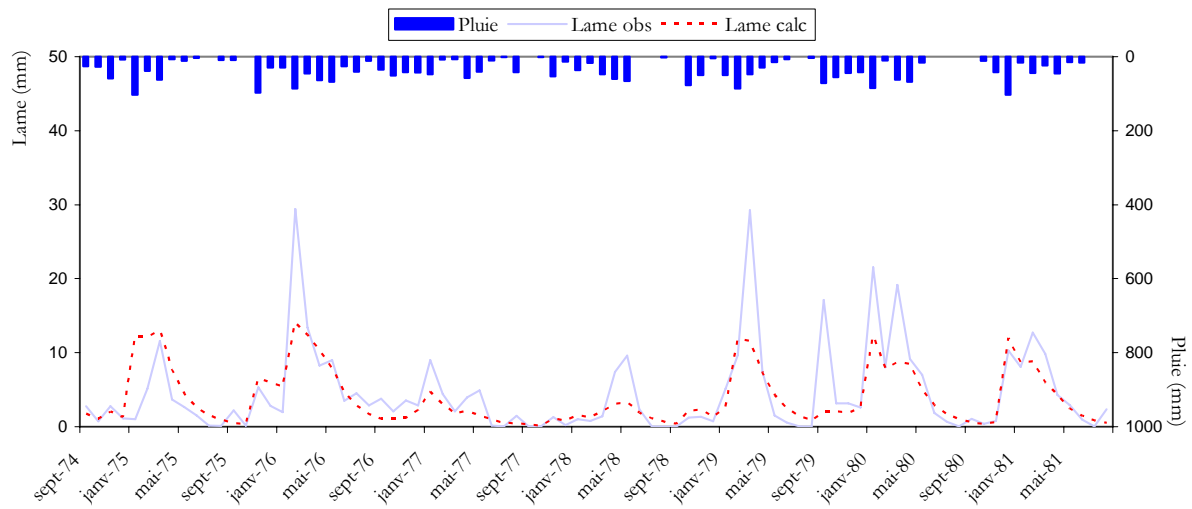


Figure 5.13. : Calibration du modèle GR2M sur les données de la station 090305

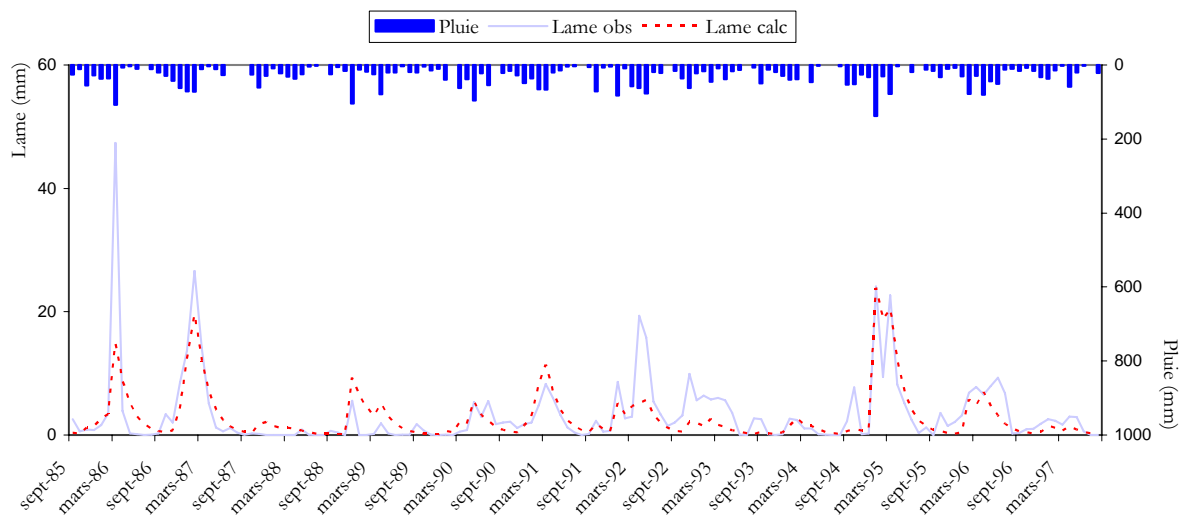


Figure 5.14. : Validation du modèle GR2M sur les données de la station 090305

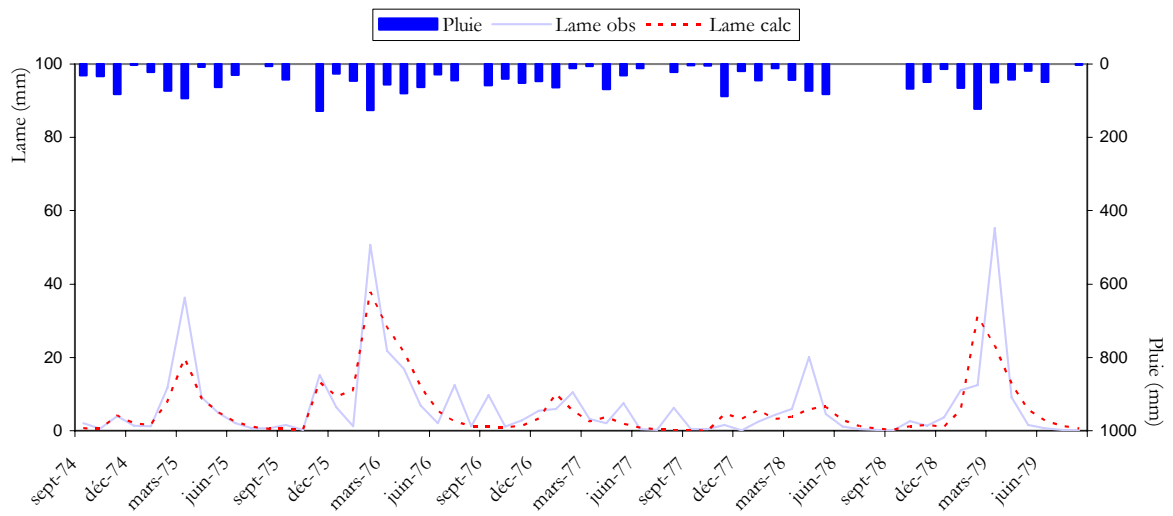


Figure 5.15. : Calibration du modèle GR2M sur les données de la station 090309

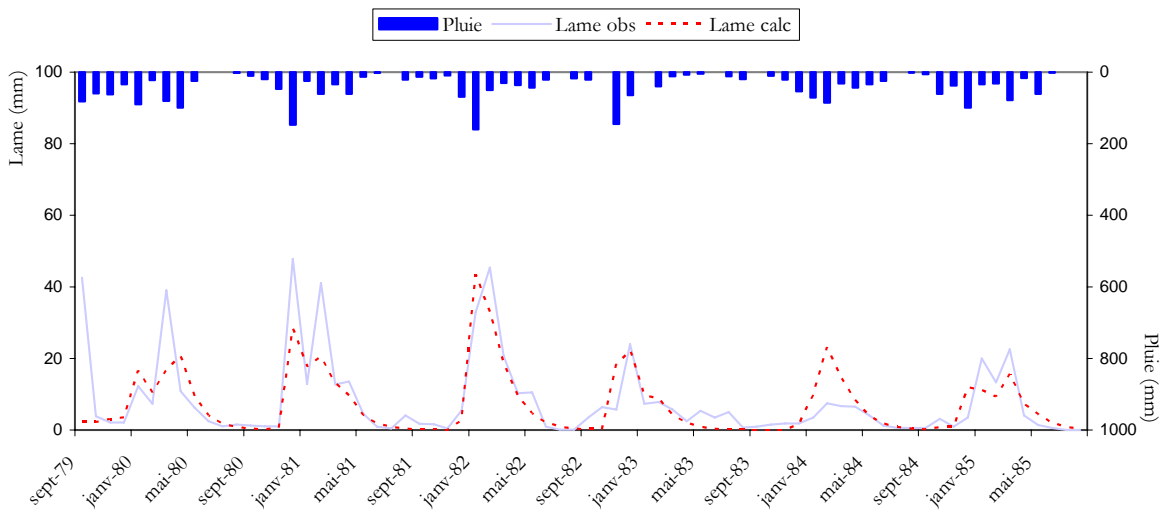


Figure 5.16. : Validation du modèle GR2M sur les données de la station 090309

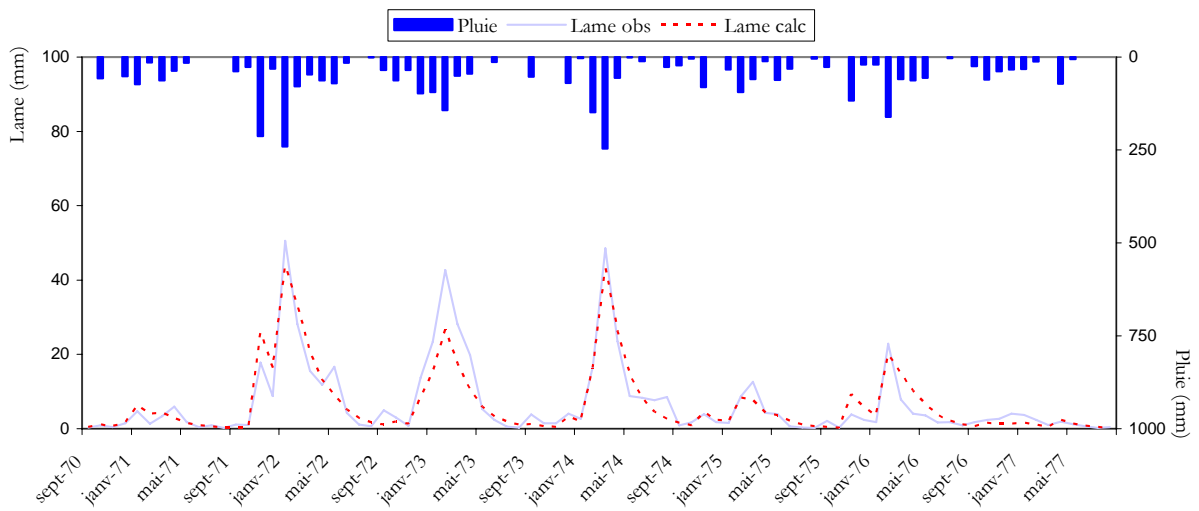


Figure 5.17. : Calibration du modèle GR2M sur les données de la station 090408

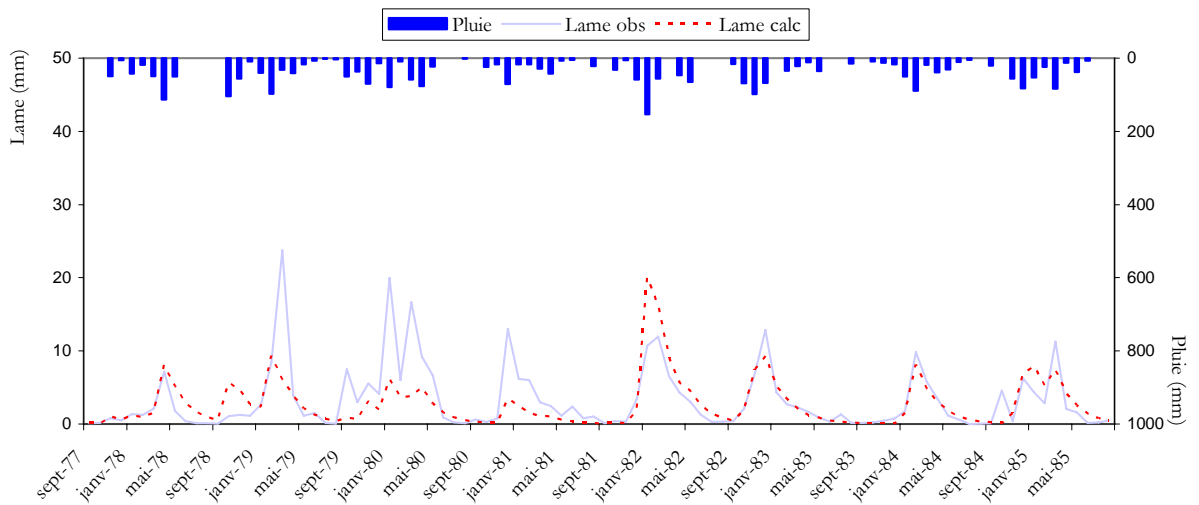


Figure 5.18. : Validation du modèle GR2M sur les données de la station 090408

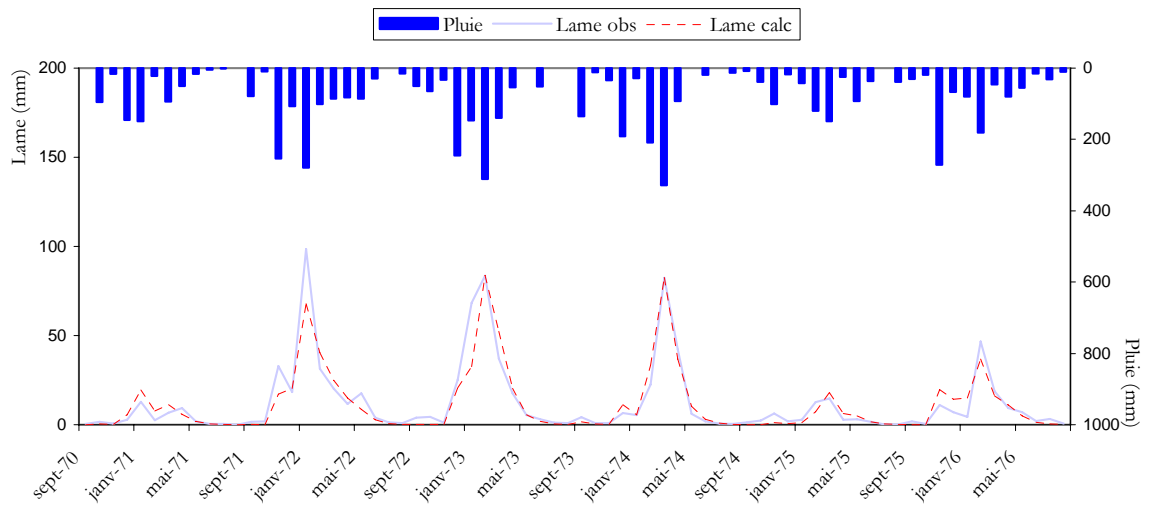


Figure 5.19. : Calibration du modèle GR2M sur les données de la station 090501

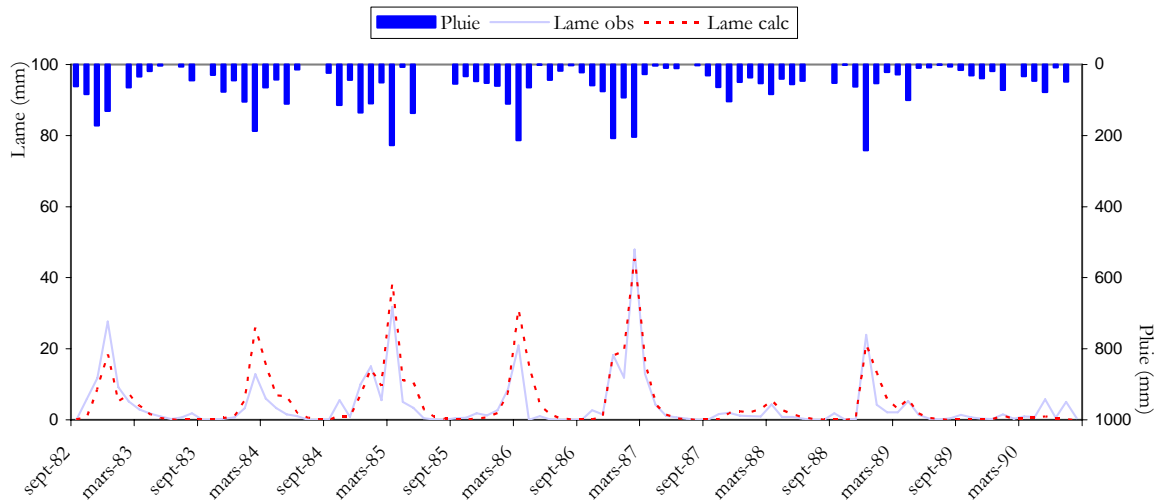


Figure 5.20. : Validation du modèle GR2M sur les données de la station 090501



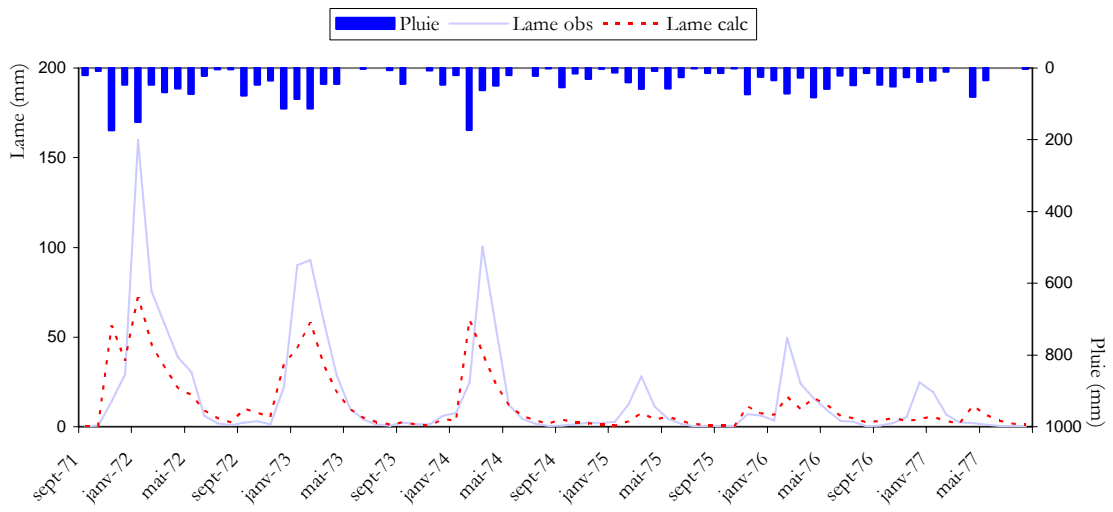


Figure 5.21. : Calibration du modèle GR2M sur les données de la station 150106

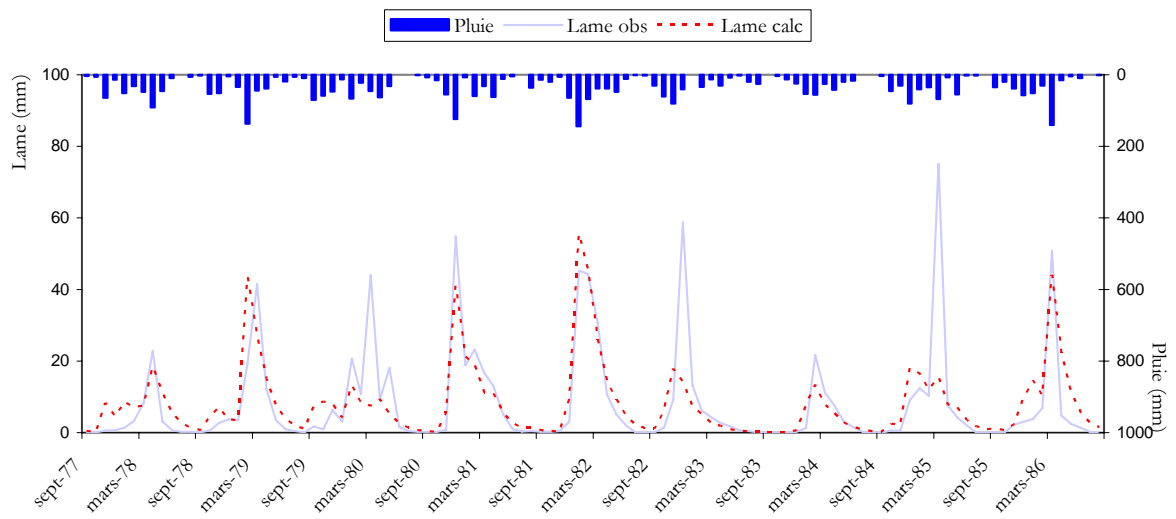


Figure 5.22. : Validation du modèle GR2M sur les données de la station 150106

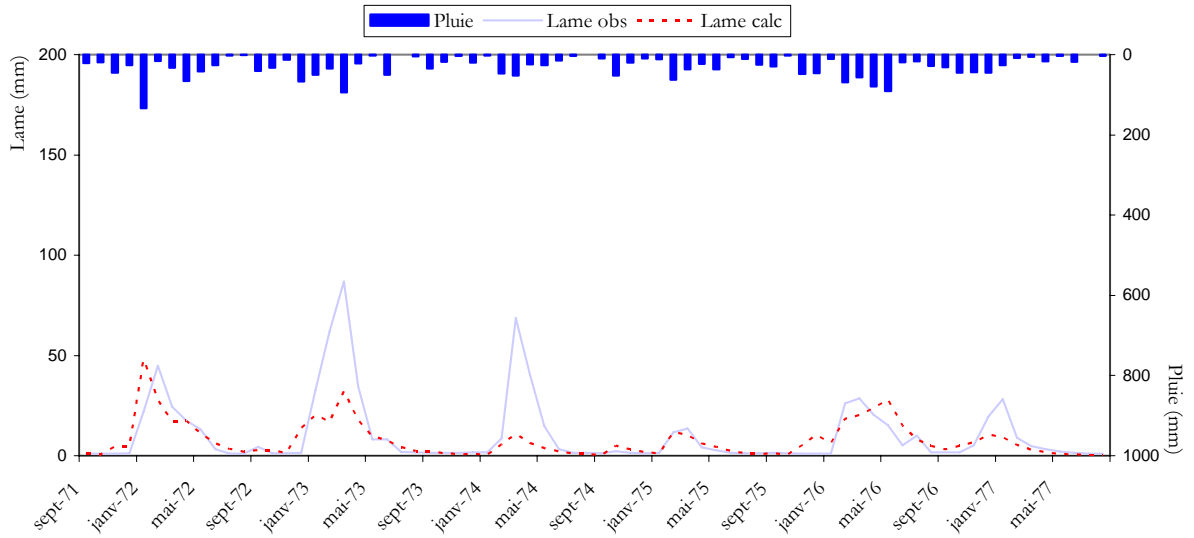


Figure 5.23. : Calibration du modèle GR2M sur les données de la station 150601

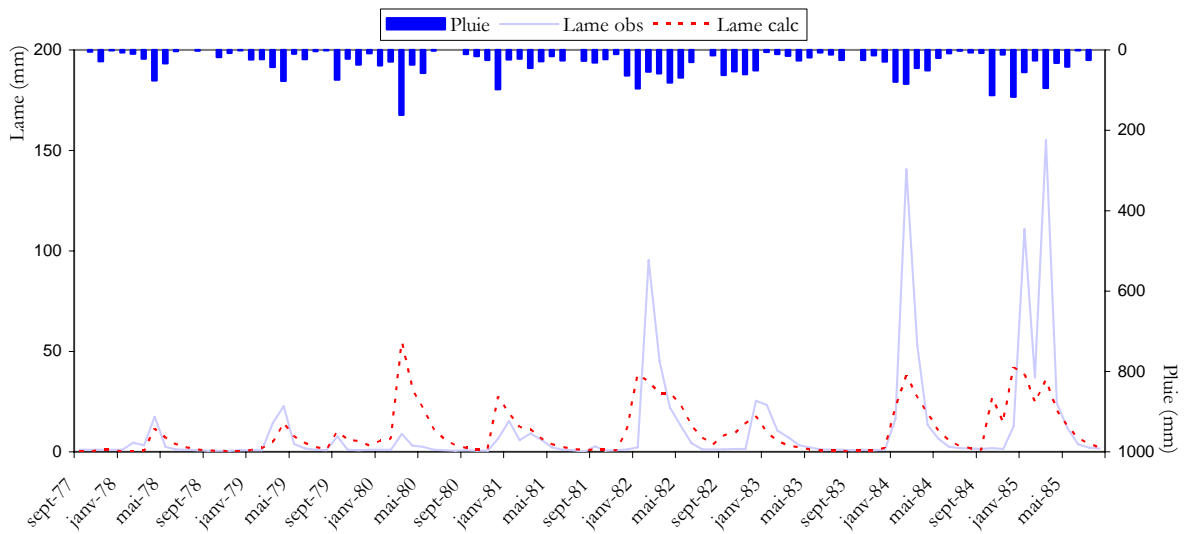


Figure 5.24. : Validation du modèle GR2M sur les données de la station 150601

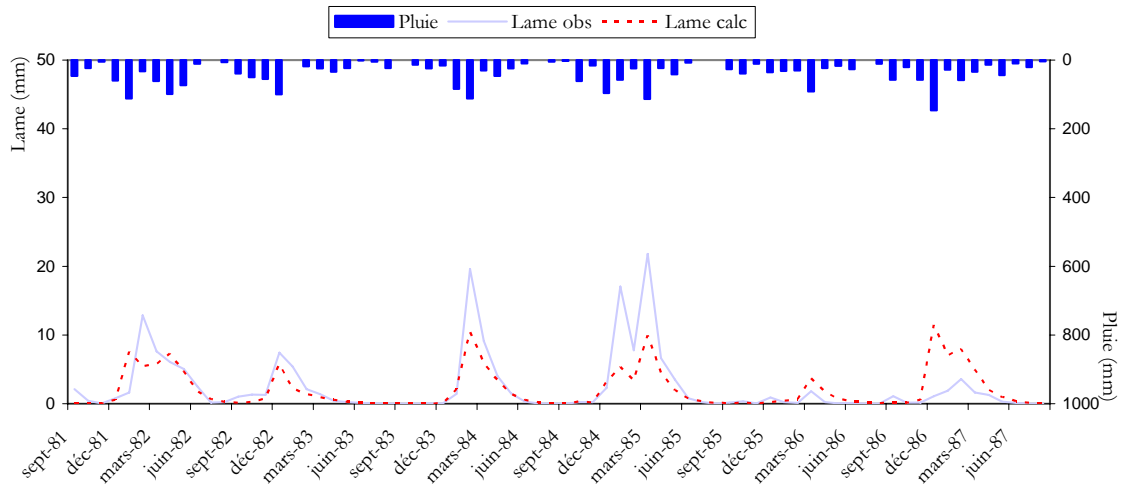


Figure 5.25. : Calibration du modèle GR2M sur les données de la station 150702

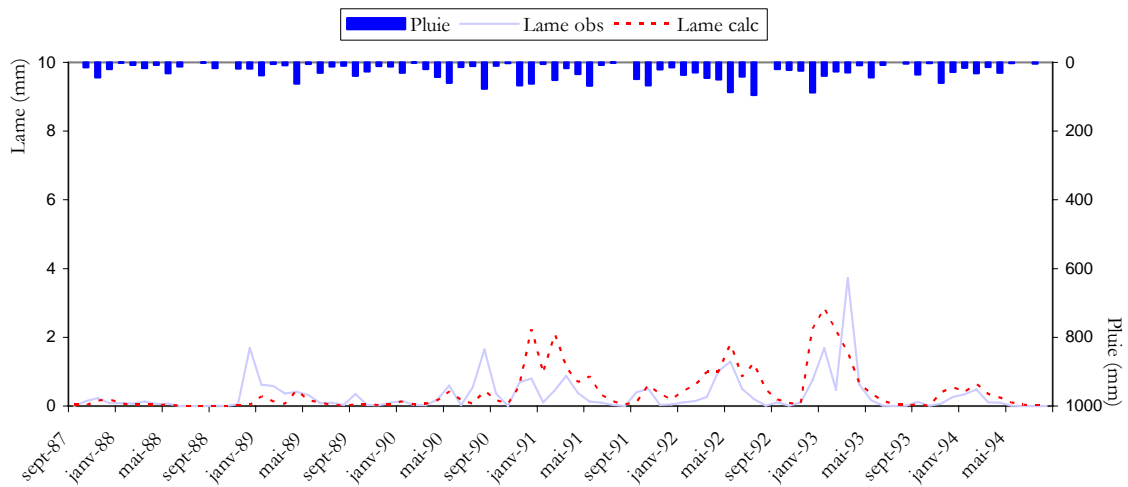


Figure 5.26. : Validation du modèle GR2M sur les données de la station 150702

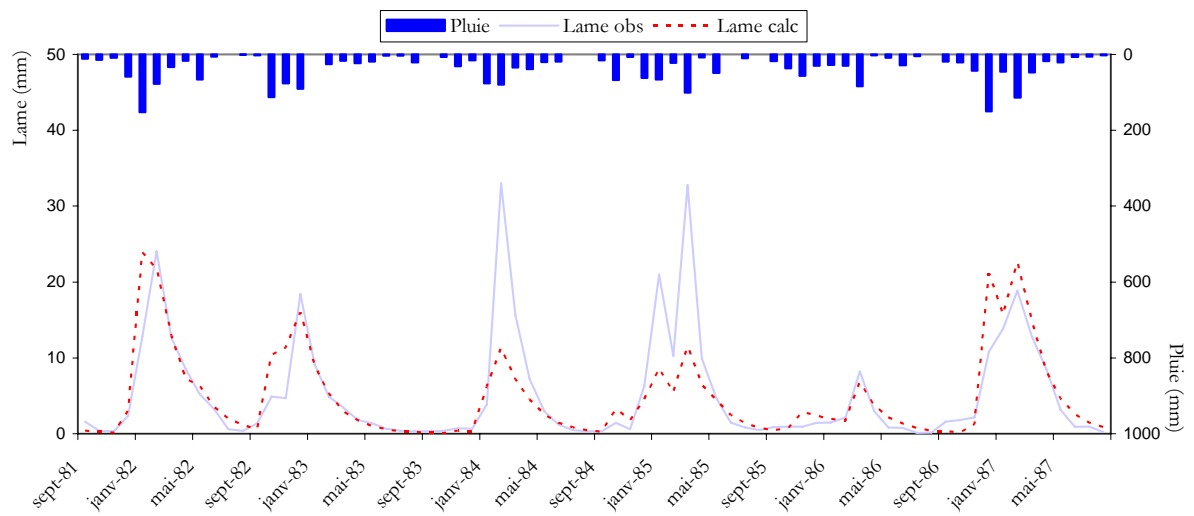


Figure 5.27. : Calibration du modèle GR2M sur les données de la station 150901

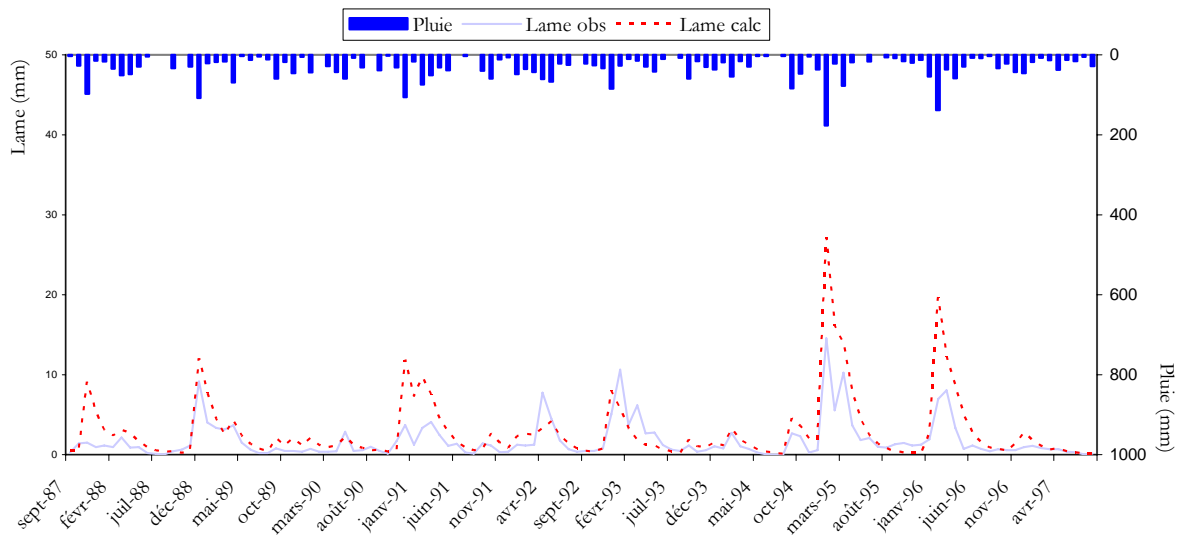


Figure 5.28. : Validation du modèle GR2M sur les données de la station 150901

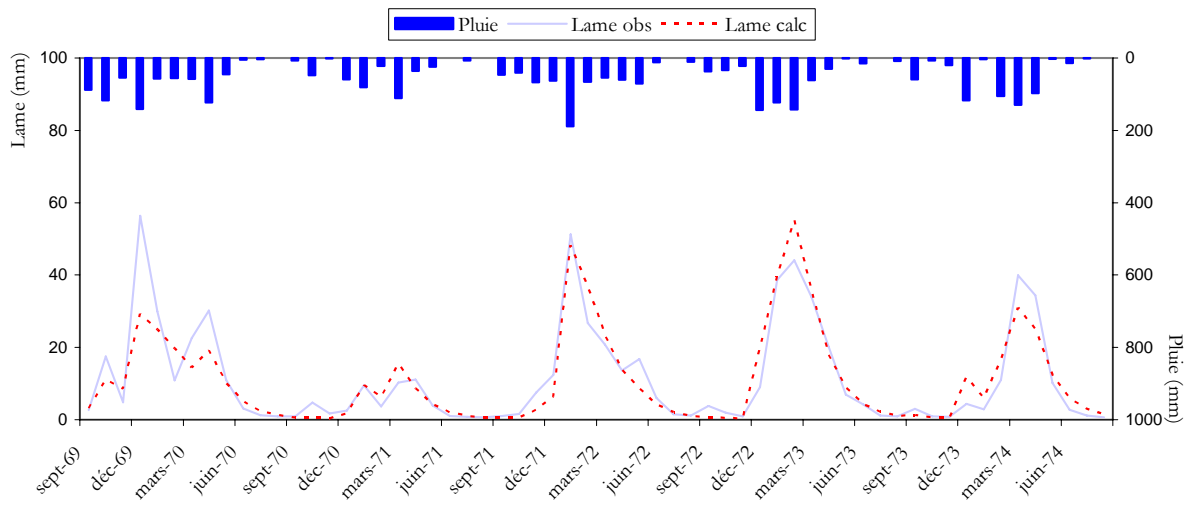


Figure 5.29. : Calibration du modèle GR2M sur les données de la station 151001

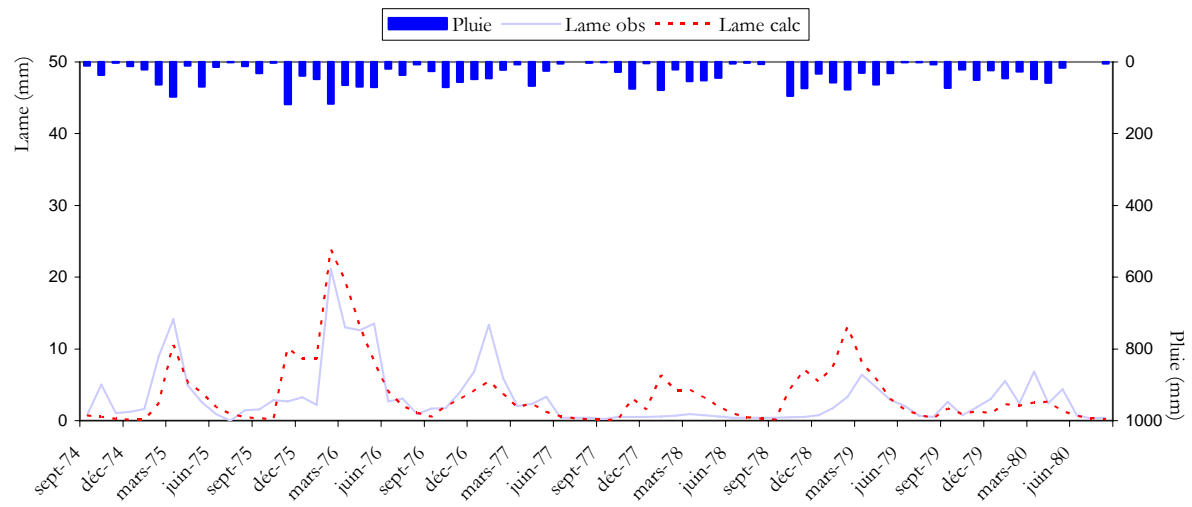


Figure 5.30. : Validation du modèle GR2M sur les données de la station 151001

### 5.5.3. Extension des séries des apports

Après avoir calé et validé le modèle GR2M pour toutes les stations hydrométriques retenues, nous avons procédé à l'extension des séries de données de ces stations à partir des données pluviométriques et en gardant les mêmes paramètres de calage obtenus pour chaque bassin. Cette simulation a donné des résultats très acceptables (voir annexes 1.2 et 1.3).

### 5.6. Conclusion

L'application du modèle GR2M sur les données des sous bassins de la Soummam et de l'Isser a donné des résultats très satisfaisants, vu que l'optimisation des paramètres de calage a été obtenue pour des valeurs de Nash supérieures à 50%. Et ce en calant le paramètre A (capacité maximale du réservoir sol).

L'analyse des résultats numériques, à savoir les rapports des moyennes des débits observés et calculés par le modèle, rapport des écart-types et les coefficients de corrélation pour les pas de temps mensuel et annuel, montre que les lames d'eau calculées présentent une bonne concordance avec les lames d'eau observées.

Ainsi les résultats graphiques des débits simulés présentent des allures qui épousent quasi-parfaitement celles des débits observés (de manière acceptable), et ce pour tout les bassins étudiés. On peut dire que la qualité de simulation du modèle GR2M est bonne.

Enfin l'extension des séries des apports, en utilisant les mêmes paramètres de calage optimisés pour chaque bassin, nous a permis de générer des séries des apports d'eau à partir des données pluviométriques observées. Ces apports d'eau générés peuvent être exploités pour une meilleure gestion de l'eau pour les bassins versants de la Soummam et de l'Isser.

## Chapitre 6

### Utilisation dans un modèle hydrologique de l'information contenue dans des descripteurs du bassin versant

#### 6.1. Introduction

La simulation des débits sur des bassins versants non jaugés était un des objectifs de développement des modèles dont les paramètres peuvent être mesurés sur le terrain. Parmi ces modèles, ceux fondés sur la physique qui utilisent des paramètres généralement mesurables et leur détermination ne nécessite donc pas en théorie (rarement en pratique) de processus d'optimisation mathématique. Adoptant une approche différente, les modèles conceptuels ou empiriques globaux qui ne cherchent pas à représenter la complexité et l'hétérogénéité du bassin, dépendent de paramètres qui n'ont généralement pas de correspondant direct sur le terrain a priori.

Leur utilisation sur des bassins versants non jaugés présuppose donc qu'un lien puisse être établi entre la valeur de ces paramètres et des descripteurs mesurables du bassin. Cette démarche est désignée par le terme de régionalisation des paramètres en modélisation hydrologique pluie-débit (Perrin, 2000). Il s'agit en fait d'un type particulier d'application du modèle.

On se propose dans ce chapitre, d'établir des liens entre paramètres du modèle et descripteurs du bassin en utilisant les régressions simples ou multiples.

#### 6.2. Approches de régionalisation

Lorsqu'un modèle de transformation de la pluie en débit est utilisé, ses paramètres peuvent être liés de diverses façons aux descripteurs du bassin ; on en distingue deux approches :

- Quantification de la relation pluie-débit à une échelle régionale, en décrivant les similarités de comportement entre bassins (éventuellement adjacents). Des méthodes sont proposées pour transférer les paramètres caractérisant

les groupes de bassins à des bassins non jaugés avec des caractéristiques similaires en utilisant des mesures de similarités (Nathan et Mc Mahon, 1990, Burn et Boorman ; 1993).

- Etude des liens entre les paramètres du modèle et les caractéristiques du bassin en utilisant des procédés de type régressif (régressions simples ou multiples).

Ces deux approches peuvent être complémentaires. Dans notre cas, nous nous intéressons à la seconde qui est la plus couramment appliquée en hydrologie. Le but de cette seconde approche est d'arriver à extraire un maximum d'information de caractéristiques physiques ou climatiques du bassin pouvant avoir une pertinence hydrologique, autrement dit pouvant influencer la transformation de la pluie en débit.

Ce lien peut être fait entre les caractéristiques du bassin et ce qui, dans le modèle, caractérise la transformation pluie-débit sur ce même bassin, c'est à dire les paramètres (Perrin, 2000). La méthode utilisée pour établir des liens entre descripteurs du bassin et paramètres est généralement composée des étapes suivantes :

1. Sélection d'un jeu de bassins,
2. calage du modèle sur chaque bassin (ou chaque bassin-période) pour obtenir les valeurs des paramètres du modèle dans chaque cas,
3. sélection d'un ensemble de variables physiques (topographie, morphologie, physiographie, couvert végétal, pédologie, géologie...) ou climatiques (décrivant le régime des pluies ou l'évapotranspiration) qui sont supposées pertinentes relativement à leur influence sur le transformation pluie-débit,
4. établissement de relations entre les paramètres du modèle et les variables explicatives sélectionnées en utilisant des régressions simples ou multiples, dans lesquelles paramètres et variables peuvent éventuellement avoir subi des transformations préalables (logarithmique ou puissance par exemple),
5. comparaison (pas toujours réalisée) des résultats du modèle obtenus d'une part avec les paramètres calés et d'autre part avec les paramètres prédéterminés par les équations de régionalisation. Parfois cette évaluation est réalisée sur un échantillon de bassins n'ayant pas servi à la mise au point des équations de régression.



## 6.3. Les méthodes relatives à la régression

### 6.3.1. Présentation générale

Peut-on prédire les scores d'une variable  $Y$  (appelée "critère") à partir des scores d'un jeu d'autres variables  $X_1, \dots, X_p$  (appelées "prédicteurs")? La réponse intuitive (et justifiable formellement) est "oui, dans la mesure où le critère est statistiquement lié aux prédicteurs": dès qu'il y a dépendance entre variables, cette dernière peut être exploitée pour prédire certains scores individuels à partir d'autres scores relatifs au même individu, et cette prédiction, qui peut s'avérer en définitive bonne ou médiocre, devrait dans tous les cas être au moins aussi bonne qu'une prédiction qui ne tiendrait pas compte des scores des variables liées au critère.

### 6.3.2. Les conditions d'application

D'une manière générale, les problèmes de régression et de corrélation peuvent se présenter sous différents aspects, en relation notamment avec la nature des données et le but poursuivis ; Le cas le plus simple est celui où l'une des deux variables étudiées ne prend que certaines valeurs choisies a priori, de façon arbitraire ; il s'agit typiquement des problèmes de dépendance (P. Dagnelie ; 1975).

- La variable indépendante  $x$  n'est pas aléatoire, par contre, la variable  $y$  est dépendante. Le but final est généralement d'estimer la valeur de la variable dépendante en fonction de la variable indépendante.

On suppose habituellement, dans ce cas, que la régression de  $y$  en  $x$  est linéaire et que les différentes valeurs de  $y$  sont normales, indépendantes et de même variance. Ces conditions peuvent être énoncées également en écrivant le modèle théorique :

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + \varepsilon_i \quad \text{Eq. (6.1)}$$

Et en supposant que les variables aléatoires  $\varepsilon_i$  sont normales, indépendantes, de moyenne nulle et de même variance. En raison de la linéarité de la régression, cette variance commune est à la fois une variance conditionnelle (variance de  $Y_i$  pour  $x$  fixé) et une variance résiduelle (variance des écarts de  $Y_i$  par rapport à la droite de régression).

- Un deuxième type de données correspond au cas où les deux variables considérées  $x$  et  $y$  sont aléatoires. Le but poursuivi peut être alors la recherche d'une relation de dépendance d'une variable en fonction de l'autre. Les méthodes à utiliser et leurs conditions d'application sont pratiquement les mêmes que pour le premier cas, il faut cependant ajouter aux conditions d'application l'indépendance des variables  $x$  et  $\varepsilon_i$ .

- Dans le cas de deux variables aléatoires, le but poursuivi peut être aussi d'établir une relation d'interdépendance entre les deux variables, considérés sur le même pied, tel est l'objet de la régression au sens des moindres rectangles. Le modèle théorique dans ce cas est celui d'une distribution normale à deux dimensions. En outre, les échantillons considérés sont évidemment supposés aléatoires et simples.
- Dans certains cas, l'emploi d'autres modèles, généralement plus complexes, doit être envisagé ; c'est le cas de la régression non linéaire, sous l'angle de la dépendance d'une variable en fonction de l'autre.

### 6.3.3. Régression simple

#### 6.3.3.1. Le modèle théorique de la régression simple

On considère le cas de deux variables X (explicative) et Y (à expliquer). Expliquer signifie ici exprimer une dépendance fonctionnelle de Y comme fonction de X, de manière à prévoir la valeur de Y connaissant celle de X. Si pour tout individu i,  $Y_i = f(X_i)$ , et si on observe une valeur  $X_{n+1}$  de la variable X sur un nouvel individu, on donnera  $f(X_{n+1})$  comme prédiction de la variable Y sur ce même individu. La situation idéale où  $Y = f(X)$  n'est jamais rencontrée en pratique.

On cherchera plutôt, dans une famille fixée de fonctions, quelle est celle pour laquelle les  $Y_i$  sont les plus proches des  $f(X_i)$ . La proximité se mesure en général comme une erreur quadratique moyenne

$$EQ(f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - f(X_i))^2 \quad \text{Eq. (6.2)}$$

On parle alors de régression au sens des moindres carrés. Les différences entre les valeurs observées  $Y_i$  et les valeurs prédites par le modèle  $f(X_i)$  s'appellent les résidus.

#### 6.3.3.2. Cas où la régression est linéaire

Ce cas, le plus important en pratique, est celui où l'espérance

$$E(Y/X) = \alpha + \beta X \quad \text{Eq. (6.3)}$$

(ceci se produit en particulier si X et Y suivent une loi normale à deux dimensions).

On a donc :

$$Y = \alpha + \beta X + \varepsilon \quad \text{Eq. (6.4)}$$

En prenant l'espérance des deux membres de la relation  $E(Y/X)$ , il vient :

$$E(Y) = \alpha + \beta E(X) \quad \text{Eq. (6.5)}$$

La droite de régression passe donc par le point de coordonnées  $(E(X), E(Y))$ .

On a :

$$Y - E(Y) = \beta(X - E(X)) + \varepsilon \quad \text{Eq. (6.6)}$$

Après transformation, l'équation de la droite de régression devient donc :

$$E(Y / X) - E(Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{V(X)}(X - E(X)) \quad \text{Eq. (6.7)}$$

d'où :

$$Y = E(Y) + \rho \frac{\sigma_y}{\sigma_x}(X - E(X)) + \varepsilon \quad \text{Eq. (6.8)}$$

### 6.3.4. Régression multiple

La régression multiple constitue une technique de prédiction multivariée (car basée sur plusieurs prédicteurs) réservée aux variables de type numérique (ou catégoriel bimodal à la rigueur). Elle généralise ainsi la technique de régression simple, de laquelle elle conserve les notions fondamentales que sont valeurs observées versus prédites, les résidus, la proportion de variance expliquée par le modèle, etc...

#### 6.3.4.1. Conditions d'application

Utilisée chaque fois qu'une variable observée, dite variable dépendante, doit être exprimée en fonction de 2 ou plusieurs autres variables observées, dites indépendantes ou explicatives. Le cas le plus simple est celui où les variables explicatives sont des variables non aléatoires, leurs valeurs étant toutes choisies a priori de façon arbitraire (dose d'un médicament par exemple...). On suppose que la relation est linéaire et que les différentes valeurs de la variable dépendante sont extraites de distributions normales, indépendantes de même variance

#### 6.3.4.2. Le Modèle théorique de la régression multiple

On se limitera au cas de la prédiction dite linéaire, pour laquelle on cherchera les meilleurs paramètres possibles  $b_0, b_1, \dots, b_p$  (appelés coefficients de régression) dans la formule

$$Y^* = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_p X_p = b_0 + bX + d_a \quad \text{Eq. (6.9)}$$

où,  $Y^*$  est la valeur prédite, à distinguer de la valeur observée  $Y$

Les conditions peuvent être exprimées en affirmant que les résidus aléatoires  $\epsilon$  relatif aux différents individus  $a$  doivent tous posséder une même distribution normale de moyenne nulle et de variance constante et qu'ils doivent être indépendants les uns des autres. D'autre part les  $p$  variables explicatives peuvent être des variables aléatoires dont les valeurs sont observées dans des conditions analogues à celle de la variable dépendante.

Une analyse en régression (linéaire) multiple répond à trois questions principales:

- la prédiction du critère  $Y$  par une combinaison linéaire des prédicteurs  $X_1, \dots, X_p$  est-elle bonne ou précise ? En d'autres termes, quel est le degré de proximité entre  $Y$  et  $Y^*$  ? Ce dernier est mesuré par le coefficient de corrélation multiple  $R := \text{corr}(Y, Y^*)$  dont le carré  $R^2$  (appelé coefficient de détermination) s'interprète comme le pourcentage de variance (de  $Y$ ) "expliqué" par les variables  $X_1, X_2, \dots, X_p$ .
- cette relation entre  $Y$  et  $Y^*$  (ou, ce qui revient au même, entre  $Y$  d'une part et  $X_1, X_2, \dots, X_p$  d'autre part) est-elle significative ? En d'autres termes, le modèle de régression que l'on est en train d'examiner a-t-il quelque chance de refléter des régularités observables au-delà de l'échantillon considéré, ou au contraire ne reflète-t-il que des relations anecdotiques propres à cet échantillon et à lui seul ?
- la nécessité d'inclure une variable donnée  $X_j$  dans la liste des prédicteurs est-elle vraiment justifiée ? De façon équivalente, la non-nullité du coefficient de régression correspondant  $b_j$  est-elle statistiquement significative ? Si tel n'était pas le cas, il faudrait éliminer  $X_j$  comme prédicteur. Le modèle résultant sera alors à la fois plus simple et (légèrement) moins précis (diminution de  $R$ ) par rapport au modèle incluant le prédicteur  $X_j$ , mais probablement mieux généralisable que ce dernier à d'autres échantillons issus de la même population.

### 6.3.4.3. Cas particulier de 2 variables explicatives

L'équation recherchée est de la forme :

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 \quad \text{Eq. (6.10)}$$

Estimation et intervalle de confiance des paramètres; les Coefficients de régression partielle  $b_1$  et  $b_2$  sont donnés par :

$$\hat{\beta}_1 = b_1 = \frac{SPE_{1y} SCE_2 - SPE_{12} SPE_{2y}}{SCE_1 SCE_2 - SPE_{12}^2} \quad \text{Eq. (6.11)}$$

$$\hat{\beta}_2 = b_2 = \frac{SPE_{2y} SCE_1 - SPE_{12} SPE_{1y}}{SCE_1 SCE_2 - SPE_{12}^2} \quad \text{Eq. (6.12)}$$

Les indices 1 et 2 correspondent aux variables explicatives  $X_1$  et  $X_2$  et  $Y$  à la variable expliquée. Avec  $SPE$  et  $SCE$  sont respectivement somme des produits des écarts aux moyennes et somme des carrés des écarts à la moyenne données par :

$$SPE = \left[ \sum_{i=1}^n x_i^* y_i - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i \right) \right] \quad \text{Eq. (6.13)}$$

$$SCE = \left[ \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \quad \text{Eq. (6.14)}$$

**Et la covariance ;**

$$\text{cov}(x, y) = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n x_i^* y_i - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i \right) \right] \quad \text{Eq. (6.15)}$$

**Ordonnée à l'origine :**

$$\beta_0 = b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x}_1 - b_2 \bar{x}_2 \quad \text{Eq. (6.16)}$$

Les résidus sont les différences entre la réalité et la représentation.

**Variance résiduelle**, elle est donnée par :

$$\hat{\sigma}_{y,12}^2 = \frac{SCE_{y,12}}{n-3} = \frac{1}{n-3} \left( SCE_y - \frac{SCE_1 SPE_{2y}^2 + SCE_2 SPE_{1y}^2 - 2 SPE_{12} SPE_{1y} SPE_{2y}}{SCE_1 SCE_2 - SPE_{12}^2} \right) \quad \text{Eq. (6.17)}$$

**Tests de conformité et de signification des coefficients de régression partielle**

- **Test de conformité**

$H_0 \beta_1 = \beta_1 \text{théo}$

$$t_{obs} = |b_1 - \beta_1 \text{théo}| \sqrt{\frac{SCE(1-r_1^2)}{\hat{\sigma}_{y,2}^2}} \quad \text{Eq. (6.18)}$$

- **Test de signification**

$\beta_1 \text{théo} = 0 \text{ DDL} = n-3$

• **Analyse de la variance**

1. Strictement équivalent au test t
2. Permet de tester globalement la signification des 2 coefficients de régression partielle
3.  $H_0 \beta_1 = \beta_2 = 0$

**6.3.4.4. Tableau de l'analyse de la variance**

Principe : Décomposition de la somme des carrés des écarts totale  $SCE_y$ , en une somme des carrés des écarts résiduelle  $SCE_{y.1...p}$  ou  $SCE_{y.x}$  et une somme des écarts factorielle :

$SCE_{y(1..p)}$  ou  $SCE_{yx} - SCE_{y.x}$   
qui possède p degrés de liberté

Source de variation	DDL	Somme des carrés des écarts	Carré moyen	F
Régression multiple : X	p	$SCE_{yx}$	$CM_{yx}$	$F_{yx}$
Variation résiduelle	n-p-1	$SCE_{y.x}$	$Cm_{y.x}$	
Total	n-1	$SCE_y$		

**6.3.4.5. Coefficient de corrélation multiple**

$$R = \sqrt{1 - \frac{SCE_{y.x}}{SCE_y}}$$

Eq. (6.19)

Somme des carrés des écarts résiduelle  
Somme des carrés des écarts y

$R^2$  = Coefficient de détermination multiple  
= part de variance expliquée

$$F = \frac{(n - p - 1)R^2}{p(1 - R^2)}$$

Eq. (6.20)

DDL ; n-p-1

**6.3.4.6. Coefficient de corrélation partielle**

Cas de 3 variables x, y, z ; Le coefficient de corrélation partielle entre y et z est le coefficient de corrélation entre les résidus  $y - y(x)$  et  $z - z(x)$  des régressions linéaires à deux dimensions

$$r_{yz.x} = \frac{r_{yz} - r_{xy}r_{xz}}{\sqrt{(1 - r_{xy}^2)(1 - r_{xz}^2)}} \quad \text{Eq. (5.21)}$$

On définit de la même façon les coefficients de corrélation partielle x et y et x et z. Ils mesurent l'intensité de la relation qui existe entre deux variables indépendamment de l'influence de la troisième. Ces notions s'étendent à p variables.

## 6.4. Application aux bassins versants de la Soummam et de l'Isser

### 6.4.1. Choix et analyse de variables explicatives

Les descripteurs retenus sont simples et correspondent au niveau d'information dont nous avons disposé pour notre travail sur tous les bassins étudiés. Les quatre variables explicatives choisies sont :

- La superficie du bassin S, en Km<sup>2</sup>,
- La pluie annuelle moyenne PAM, en mm,
- L'ETP annuelle moyenne EAM, en mm,
- Le coefficient d'irrégularité saisonnière des pluies CP, en %, défini par :

$$CIP = 100 \frac{P_{mx} - P_{mn}}{P_m} \quad \text{Eq. (6.22)}$$

où,  $P_{mx}$  est la pluie moyenne mensuelle du mois le plus pluvieux  
 $P_{mn}$  est la pluie moyenne mensuelle du mois le moins pluvieux  
 $P_m$  est la pluie moyenne mensuelle

On récapitule les variables explicatives des bassins utilisés dans le tableau (6.1).

Tableau 6.1 : Caractéristiques des bassins utilisés pour la prédétermination des paramètres

	<b>S</b>	<b>PAM</b>	<b>EAM</b>	<b>CIP</b>
<b>code</b>	<b>(km<sup>2</sup>)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(%)</b>
<b>090101</b>	665	360	1475	101
<b>090305</b>	273	461	1480	116
<b>090309</b>	73	470	1394	129
<b>090408</b>	2570	380	1472	160
<b>090501</b>	3615	735	1455	188
<b>150106</b>	840	470	1435	145
<b>150601</b>	105	390	1240	142
<b>150702</b>	2350	450	1385	132
<b>150901</b>	4050	420	1502	167

151001	8420	490	1420	181
--------	------	-----	------	-----

Pour vérifier l'indépendance des paramètres, nous avons dressé la matrice de corrélation des paramètres transformés, donnée dans le tableau (6.2). Les paramètres  $X_1$  et  $X_2$  sont largement indépendants, avec un coefficient de corrélation faible. Ces résultats de corrélation confirment que les paramètres du modèle ont peu de liens entre eux et que les problèmes d'interaction sont donc faibles.

Tableau 6.2 : Matrice de corrélation entre paramètres

	$\text{Ln}(X_1)$	$\text{Ln}(X_2)$
$\text{Ln}(X_1)$	1	-0.1
$\text{Ln}(X_2)$	-0.1	1

De même pour la vérification de l'indépendance des variables explicatives, la matrice de corrélation entre ces variables (Tableau 6.3), montre qu'elles sont indépendantes sauf pour la variable CIP qui donne un coefficient assez élevé avec la superficie S et moins élevé avec la pluie moyenne annuelle PAM.

Tableau 6.3 : Matrice de corrélation entre variables explicatives

	<b>S</b>	<b>PAM</b>	<b>EAM</b>	<b>CIP</b>
<b>S</b>	1			
<b>PAM</b>	0,3	1		
<b>EAM</b>	0,24	0,13	1	
<b>CIP</b>	0,75	0,58	0,07	1

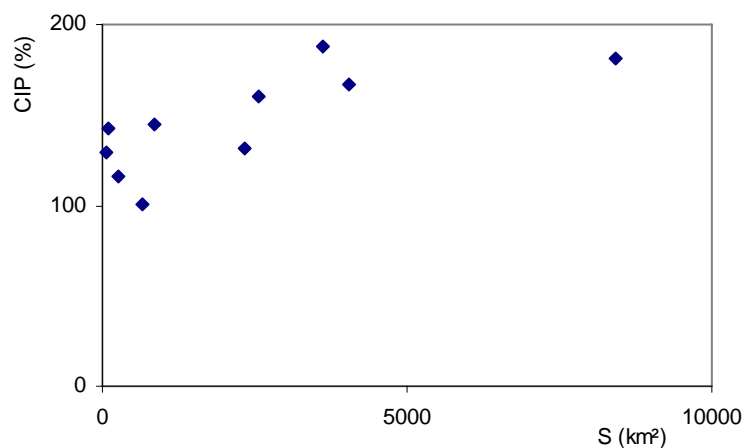


Figure 6.1 : Lien entre les variables S et CIP



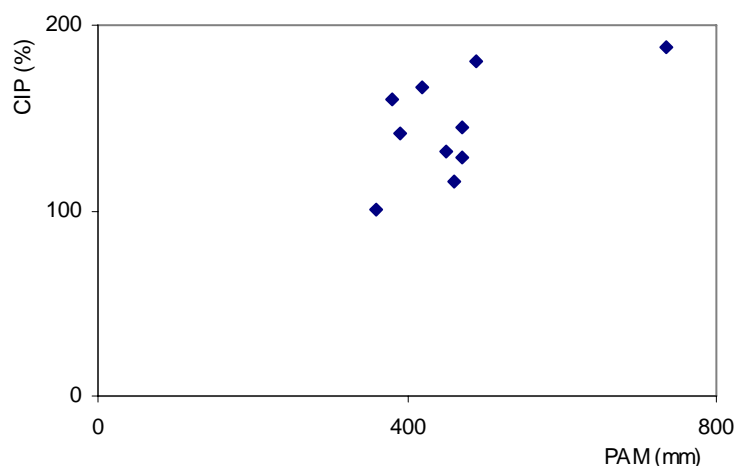


Figure 6.2 : Lien entre les variables PAM et CIP

#### 6.4.2. Recherche de relations entre paramètres du modèle et variables explicatives

Nous avons utilisé, dans la recherche de relations entre paramètres du modèle et les variables explicatives, des variables composites issues de plusieurs des variables citées précédemment tels que ; le rapport de la pluie moyenne PAM à l'ETP moyenne EAM, le rapport de la superficie à la pluie moyenne PAM.

En utilisant l'outil de régression linéaire multiple, fondé sur le modèle linéaire général suscité, dans notre cas nous avons utilisé le logiciel SPSS 8.0 pour Windows pour les régressions linéaires, nous avons pu établir les relations données ci-dessous entre les transformés logarithmiques des paramètres du modèle et des variables explicatives choisis. Les paramètres sont optimisés de manière à maximiser le coefficient de détermination (carré du coefficient de corrélation de la relation linéaire).

La qualité de l'ajustement peut être aussi évaluée par l'erreur standard. La significativité de la relation peut être estimée par la variable de Student et du coefficient de Fisher qui fixe les minima acceptables pour le coefficient de détermination. Si la valeur observée du coefficient de Fisher est inférieure au quantile  $1-\alpha$  ( $\alpha$  est la probabilité estimée du modèle) de la distribution théorique de F (Fisher-Snedecor), le modèle présente donc un seuil de significativité satisfaisant. On remarque que l'utilisation de paramètres transformés dans la recherche de ces relations permet d'obtenir des relations non-linéaires entre paramètres et descripteurs.

### 6.4.3. Régressions sur les paramètres transformés

Nous avons retenus les équations de prédétermination, des paramètres  $X_1$  et  $X_2$  transformés (en logarithmes), qui présentent un ajustement significatif, avec un seuil de significativité jugé satisfaisant d'après les valeurs de la variable de Fisher.

#### 6.4.3.1. Paramètre $X_1$

$$\ln(X_1) = -0.317 - 0.168 \times \ln\left(\frac{S}{PAM}\right) \quad \text{Eq. (6.23)}$$

Ce qui donne, pour le paramètre  $X_1$  réel la relation :

$$X_1 = 0.73 \left(\frac{S}{PAM}\right)^{-0.2} \quad \text{Eq. (6.24)}$$

Avec un coefficient de détermination  $R^2 = 0.45$

Tableau 6.4 : Récapitulatif du modèle de régression de  $X_1$

R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation
0,667	0,445	0,376	0,3128

Tableau 6.5: Analyse de la variance ANOVA et test de significativité correspondant

	Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Signification
Régression	0,627	1	0,627	6,415	0,035
Résidu	0,783	8	9,782E-02		
Total	1,410	9			

Tableau 6.6 : Coefficients de régression du paramètre  $\ln(X_1)$

	Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Signification
	B	Erreur standard	Bêta		
(constante)	-0,317	0,111		-2,841	0,022
LN(S/P)	-0,168	0,066	-0,667	-2,533	0,035

La signification du coefficient de régression est acceptée à une probabilité  $p = 0.035$  ; c'est à dire qu'il n'y a qu'une faible chance (03 chances sur 100) pour que la corrélation  $R$  observée ne soit due qu'au hasard de l'échantillonnage. En effet, en comparant la valeur observée de  $F$ , donnée dans le tableau (6.5), avec la valeur théorique  $F_{1-\alpha}$  relative à la distribution de Fisher-Snedecor à 1 et 8 degrés de liberté ;  $F_{obs} = 6.415$  nettement supérieure à  $F_{0,95} = 5.32$

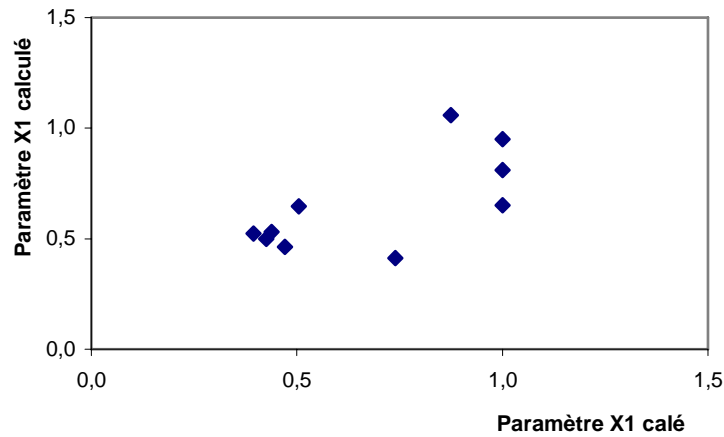


Figure 6.3 : Graphe de corrélation entre valeurs réelles de  $X_1$  calées et calculées par l'équation de prédétermination

#### 6.4.3.2. Paramètre $X_2$

$$\ln(X_2) = -1.038 + 0.275 \ln(CIP) + 0.93 \ln\left(\frac{PAM}{EAM}\right) \quad \text{Eq. (6.25)}$$

Et pour le paramètre  $X_2$ , l'équation :

$$X_2 = 0.35 \times CIP^{0.3} \left(\frac{PAM}{EAM}\right)^{0.9} \quad \text{Eq. (6.26)}$$

Avec un coefficient de détermination  $R^2 = 0.74$

Tableau 6.7 : Récapitulatif du modèle de régression de  $X_2$

R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation
0,862	0,743	0,670	0,1464

Tableau 6.8: Analyse de la variance ANOVA et test de significativité correspondant

	Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Signification
Régression	0,435	2	0,217	10,145	0,009
Résidu	0,150	7	2,142E-02		
Total	0,585	9			

Tableau 6.9 : Coefficients de régression du paramètre Ln ( $X_2$ )

	Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Signification
	B	Erreur standard	Bêta		
(constante)	-1,038	1,675		-0,620	0,555
LN(CIP)	0,275	0,295	0,213	0,932	0,382
LN(P/ETP)	0,931	0,293	0,727	3,174	0,016

Le Tableau (6.8) montre que le coefficient de régression est significatif à une probabilité  $p = 0.009$  (09 chances sur 1000 pour que la corrélation R observée ne soit due qu'au hasard de l'échantillonnage) ; tel que  $F_{obs} = 10.145$  nettement supérieure à 9.55 ; la valeur théorique de la variable de Fisher-Snedecor  $F_{0,99}$  à 2 et 7 degrés de liberté.

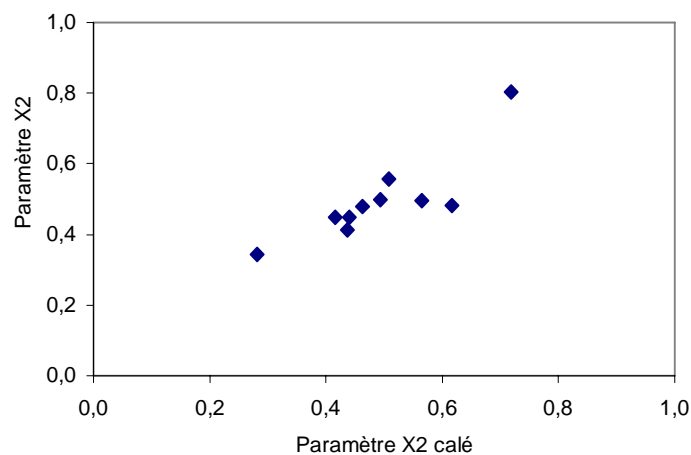


Figure 6.4 : Graphe de corrélation entre valeurs réelles de  $X_2$  calées et calculées par l'équation de prédétermination

## 6.5. Vérification directe

Le test réalisé correspond à l'étape (05) de l'approche de régionalisation suscitée, c'est-à-dire à la simulation des débits sur les bassins de l'échantillon en utilisant les équations de prédétermination.

Nous avons calculé les valeurs de Nash, calage et validation, en introduisant les paramètres calculés par les équations de prédétermination, les résultats obtenus sont très satisfaisants en calage. Or en validation les deux bassins (090101 et 150702) ont donné des valeurs de Nash négatives. Les graphiques de comparaison de ces valeurs avec celles obtenus en calant les paramètres du modèle, sont donnés dans les figures (6.5) et (6.6) pour tous les bassins étudiés.

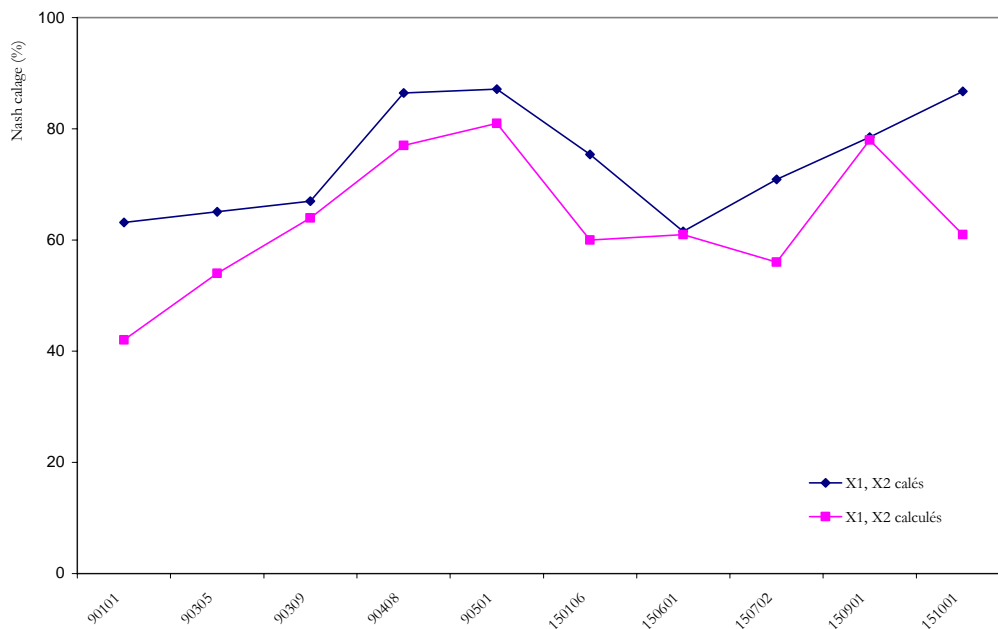


Figure 6.5 : Comparaison des valeurs de Nash pour les paramètres calés et calculés



Figure 6.6 : Comparaison des valeurs de Nash pour les paramètres calés et calculés

## 6.6. Interprétation des résultats

La recherche de relations entre les paramètres du modèle GR2M et les variables explicatives retenues, des bassins versants étudiés, et ce en utilisant les régressions multiples, a donné de bons résultats de point de vue calage, du fait que les valeurs de Nash obtenues par les paramètres calculés sont très proches de celles obtenues par les paramètres calés du modèle.

Contrairement aux résultats obtenus en validation, les valeurs de Nash n'ont pas été toutes positives, les deux bassins (090101 et 150702) ont donné des valeurs négatives de Nash. Ceci peut être expliqué par différentes suppositions :

- Les séries d'observations des données hydrométriques de ces deux bassins sont très courtes, par rapport à d'autres bassins étudiés.
- Des erreurs sur les données observées pluviométriques ou hydrométriques.
- L'échantillon de données utilisé n'est pas très appréciable par rapport à l'application de la prédétermination des paramètres du modèle pluie-débit.
- Les variables utilisés pour l'explication des paramètres de calage du modèle GR2M, à savoir les descripteurs climatiques et les superficies des bassins, n'ont pas été suffisantes pour expliquer la transformation de la pluie en débit. Il aurait été souhaitable d'utiliser d'autres variables de description des bassins.

## **6.7. Conclusion**

Nous avons recherché dans notre travail à déterminer des équations de prédétermination des paramètres du modèle hydrologique GR2M en faisant appel à des outils de régression linéaire. Ceci dit, nous avons essayé d'exploiter l'information contenue dans des descripteurs des bassins pour expliquer la variabilité des paramètres calés.

Les résultats obtenus sur les paramètres transformés du modèle sont relativement satisfaisants, ce qui indique que l'utilisation des seuls descripteurs climatiques retenus avec la superficie du bassin pour la prédétermination des paramètres du modèle, ne permet pas d'extraire une information suffisamment pertinente pour renseigner le modèle sur les caractéristiques de la transformation pluie-débit. Néanmoins, les relations de prédétermination pourraient être utilisées comme premiers estimateurs des paramètres qui seraient ensuite affinés par une procédure d'optimisation sur les données observées.

## Conclusion générale

Lors de notre travail de recherche, qui s'inscrit dans la modélisation mathématique de la pluie en débit, nous avons fait le choix d'un modèle hydrologique conceptuel 'à réservoirs' GR2M « Génie Rural, à deux paramètres de calage, et au pas de temps mensuel », afin de le caler voire, le valider sur les données hydrométéorologiques des bassins versants de la Soummam et de l'Isser.

Ce modèle est facile à mettre en œuvre du fait qu'il nécessite peu de données à savoir ; les précipitations, les évapotranspirations et les débits pour la période de calage, ainsi qu'un faible nombre de paramètres de calage (deux paramètres  $X_1$  et  $X_2$ ).

Nous avons commencé par donner la définition de la modélisation mathématique du cycle de l'eau et les différentes classes des modèles pluie-débit. Ensuite, nous avons exposés quelques modèles hydrologiques conceptuels, existant dans la bibliographie, au pas de temps mensuel, pour justifier notre choix de modèle à caler sur les données des bassins suscités.

La méthodologie de modélisation suivie pour le calage du modèle hydrologique GR2M, a été le choix de la variable cible « racine de Q », la fonction de critère « Nash » et d'une période de mise en route de un an. Ceci dit, cette tâche vise à réduire l'écart entre débits observés et calculés par le modèle. L'application de ce dernier a nécessité l'optimisation des paramètres de son calage, pour cela nous avons formulé les différentes étapes de calcul, calage et validation, sur une feuille Excel. Le critère de Nash a donné des résultats très satisfaisants, et ce en calant les paramètres  $X_1$  et  $X_2$  du modèle avec le paramètre  $\Lambda$  (capacité maximale du réservoir de production).

Les critères d'évaluation des performances du modèle, numériques et graphiques, ont donné des résultats satisfaisants en calage et en validation, dont les coefficients de corrélation entre les débits observés et calculés, les rapports des moyennes et écarts types observés et calculés, en mensuel et en annuel. Et en gardant les mêmes paramètres obtenus sur les sous-bassins versants de la Soummam et de l'Isser, nous avons procédé à l'extension des séries des débits à partir des données pluviométriques mesurées.



Enfin, nous avons essayé d'expliquer les paramètres de calage du modèle GR2M en utilisant l'information contenue dans les descripteurs des bassins étudiés et en faisant appel à des outils de régression linéaire 'logiciel SPSS'. Les résultats obtenus ont été plus ou moins satisfaisants vu les seuls descripteurs climatiques utilisés avec les superficies des bassins, ce qui nous n'a pas permis de prédéterminer les paramètres de la modélisation pluie-débit d'une façon exacte. Néanmoins, on pourrait utiliser ces relations de prédétermination établies comme premiers estimateurs des paramètres ; qui seraient ensuite affinés par une procédure d'optimisation sur les données observées.

Ceci dit, on souhaiterait, dans le futur, de faire l'extraction des informations plus pertinentes sur les bassins versants, dans le but d'expliquer les paramètres de calage du modèle GR2M, ces informations peuvent être relatifs à la topographie, la pédologie, la géologie, la végétation, la morphométrie ou autres.

Nous avons utilisé également l'outil SIG 'Systèmes d'Information Géographiques', dans le but de présenter les caractéristiques générales des bassins versants étudiés. En outre des cartes de MNT, relief, pentes et expositions, ..etc. ont été présentées. L'intérêt de l'utilité des SIG en hydrologie réside dans la gestion des bases de données numériques et cartographiques.

On souhaiterait, à la fin de ce travail, d'appliquer le modèle GR2M sur tout les bassins versants de l'Algérie, afin d'étudier la variabilité spatio-temporelle des données hydrométéorologiques et son influence sur l'efficacité de ce modèle hydrologique. Ainsi sa validation permettra de générer des débits d'eau qu'on aura nécessairement besoin pour la bonne gestion de la ressource eau en Algérie.

**Bibliographie**

- 1) **Abbott M.B., J.C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E. O'connell and J. Rasmussen. (1986).** An introduction to the European hydrological system- Système Hydrologique Européen, "SHE" , 2 : Structure of a physically-based, Distributed modelling system. Journal of hydrology , N° 87, 61-77.
- 2) **Abbott, M.B., J.C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E. O'connell and J. Rasmussen. (1986).** An introduction to the European hydrological system- Système Hydrologique Européen, "SHE" , 1 : History and philosophy of a physically-based, Distributed modelling system. Journal of hydrology, N° 87, 45-59.
- 3) **Abdulla, F-A., D-P.Lettenmaier. (1997).** Development of regional parameter estimation equation for a macroscale hydrologic model. Journal of hydrology, N° 197, 230-257.
- 4) **Abott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connel, P.E. et Rasmussen, J. (1986).** An introduction to the European Hydrological System - système hydrologique européen, " SHE ", 1. History and philosophy of a physically-based, distributed modelling sytem, Journal of Hydrology , N°87, 45-59.
- 5) **Ambroise, B. (1999).** Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : Modélisation systémique et dynamique. Revue des sciences de l'eau, N°12/1, 123-153.
- 6) **Andréassian, V., Rojas-Serna, C., Michel, C., Perrin, Ch., Mouelhi, S. and Loumagne, C. (2003).** Is the regionalization of conceptual rainfall-runoff models impossible?. Geophysical Research Abstracts, vol.5, 04175.
- 7) **Aubert, D., Loumagne, C. et Oudin, L. (2003).** Sequential assimilation of soil moisture and streamflow data in conceptual rainfall-runoff model. Journal of hydrology, 280, 145-161.
- 8) **Baptista, M. et C.Michel. (1989).** Une utilisation simple du modèle HAYAMI en hydrologie. La houille blanche N°2.
- 9) **Bathurst J.C. (1986).** Physically-based distributed modelling of an upland catchment using the Système Hydrologique Européen. Journal of hydrology N° 87, 79-102.
- 10) **Bathurst. J.C. (1986).** Sensitivity analysis of the Système Hydrologique Européen for an upland catchment. Journal of hydrology, N° 87, 103-123.
- 11) **Beldjoudi, L. (1995).** Etude générale des apports - modèle SMAP. ANRH, 297/DHYL.

- 12) **Beven, K. J. Et Kirkby, M. J. (1979)**. A physically based , variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological sciences bulletin, 24(1), 43-69.
- 13) **Beven.K.J. (1989)**. Changing ideas in hydrology- the case of physically-based models. Journal of Hydrology.105, 157-172.
- 14) **Bhaskar, J. C. C. (1999)**. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model. Journal of Hydrology. 216, 99-110.
- 15) **Bois, Ph. (1999)**. Approches probabilistes de la prédétermination des crues de la normale à l'extrême. La houille blanche N°7/8
- 16) **Bontron, G., Menez, G., Duband, D. et Gautier, J-N. (1999)**. Application de la méthode du gradex à des grands bassins versants : cas de la Loire au Bec d'Allier (32000 km<sup>2</sup>). La houille blanche, N°6
- 17) **Burn, D.H et Boorman, D.B. (1993)**. Estimation of hydrological parameters at ungauged catchments. Journal of hydrology, 143, 429-454.
- 18) **Chambaz, H. (1990)**. Contribution à l'étude de la méthode DPFT différence première de la fonction de transfert. Thèse de Magister ENP.
- 19) **Chiew, F. H. S., M. J. Stewardson et T. A. MacMahon (1993)**. Comparison of six rainfall-runoff modelling approaches. Journal of Hydrology 147: 1-36.
- 20) **Chocat, B., P.Cabane. (1999)**. Hydrologie urbaine : modélisation et effet d'échelle. La houille blanche N°7/8
- 21) **Chow. V.T., D.R.Maidment. L.W.Mays. (1988)**. Applied hydrology . Ed Mc Graw-Hill
- 22) **Clarke, R.T. (1973)**. A review of some mathematical models used in hydrology with observations on their calibration and use. Journal of hydrology, 19, 1-20.
- 23) **Cormary, Y. et A. Guilbot (1973)**. Etude des relations pluie-débit sur trois bassins versants d'investigation. IAHS Publication, n°108, 265-279.
- 24) **Crawford, N. H. Et Linsley, R.K. (1963)**. A conceptual model of the hydrologic cycle. IAHS publication, N°63, 573-587.
- 25) **Cunge, J.A.** Modèles mathématiques en hydraulique et en hydrologie. Techniques de l'ingénieur, C180, 1-17.
- 26) **Dagnelie. P. (1975)**. Théorie et méthodes statistiques- Applications agronomiques. Ed. Lavoisier
- 27) **Dawson, C.W. et Wilby, R. (1998)**. An artificial neural network approach to rainfall-runoff modelling. Hydrological sciences journal, 43(1), 47-66.
- 28) **Dooge, J.C.I (1988)**. Hydrology past and present. Journal of hydrologic research, 26(1), 5-26.
- 29) **Duband, D. (2000)**. Réflexion actuelle sur la prévision hydrométéorologique. La houille blanche, N°1.
- 30) **Edijatno, C.Michel. (1989)**. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. La houille blanche N°2, 113-121.

- 31) **Energoprojekt - Beograd. (1965).** Etude de la mise en valeur du bassin de la Soummam. Rapport final. Tome V. Données naturelles (Climat, Hydrologie, Géologie, Hydrogéologie).
- 32) **Fortin, J. P. Et Bernier, M. (1991).** La transformation de données acquises par télédétection en données utiles pour le modèle hydrologique HYDROTEL. Télédétection et gestion des ressources, vol. VII, Paul Gagnon (éd.). L'association Québécoise de télédétection, 181-188.
- 33) **Fortin, V., Ouarda, T.B.M.J. Rasmussen, P.F. et Bobée, B. (1997).** Revue bibliographique des méthodes de prévision des débits. Revue des sciences de l'eau, N°10/4, 461-487.
- 34) **Galéa, G. et Prudhomme, C. (1997).** Notions de base et concepts utiles pour la compréhension de la modélisation synthétique des régimes de crue des bassins versants au sens des modèles QdF . Revue des sciences de l'eau N°10/1, 83-101.
- 35) **Garçon, R. (2002).** L'imagerie satellitaire et radar pour la prévision hydrologique : l'expérience d'EDF. La houille blanche N°2
- 36) **Garçon, R. (1999).** Modèle global pluie-débit pour la prévision et la prédétermination des crues. La houille blanche N°7/8
- 37) **Gascuel-Odoux, C. P.Merot, P.Durand, J.Molenat. (1999).** Genèse des crues normales dans les petits bassins versants ruraux. La houille blanche, N°7/8
- 38) **Gineste, P. (2000).** Contribution des images radar ERS à la modélisation hydrologique de Coet-Dan par Top Model. La houille blanche, N°7/8
- 39) **Guo, S. Wang, J., Xiong, L., Ying, A. et Li, D. (2002).** A macro scale and semi-distributed monthly water balance model to predict climate change impacts in China. Journal of hydrology, 268, 1-15.
- 40) **Gupta, V. K. et S. Sorooshian (1983).** Uniqueness and observability of conceptual rainfall-runoff model parameters : the percolation process examined. Water Resources Research 19(1).
- 41) **Halfaoui, M. (1976).** Etude Agro-pédologique des plaines alluviales de la vallée de l'oued Isser. ANRH.
- 42) **Kabouya, M. (1990).** Modélisation pluie - débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse de Doctorat, Cemagref. Antony, Université Paris Sud, d' ORSAY: 374 p.( **in Perrin 2000**)
- 43) **Kabouya, M. et Michel, C. (1991).** Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride. Revue des sciences de l'eau, 4(4), 569-587.
- 44) **Kuczera, G. (1988).** On a validity of first-order prediction limits for conceptual hydrologic models. Journal of hydrology, 103, 229-247.

- 45) **Kutchment, L. S., Demidov, V. N., Naden, P.S., D.M. et Broadhurst, P. (1996).** Rainfall-runoff modelling of the Ouse basin, North Yorkshire: an application of a physically based distributed model. *Journal of hydrology*, 191, 323-342.
- 46) **Lahcene, S. (2003).** Modélisation des écoulements dans le bassin versant de l'Isser par le modèle SMAP. PFE, ENP.
- 47) **Larbi, T. Talibi, R. (1975).** L'oued Isser, note hydrologique. ANRH.
- 48) **Larfi, B. (2001).** Etude de transport solide dans le bassin versant de l'Isser. Application à l'envasement de barrage Beni-Amrane. Mémoire de Magister. Université de Blida.
- 49) **Lavabre, J., Arnaud, J.P., Masson, J.M et Folton, N. (1999).** Apport de la modélisation de la pluie en débit pour la connaissance de la ressource en eau et la prédétermination des crues. *La houille blanche*, N°3/4,
- 50) **Lek, S., Dimopoulos, I., M.Derraz, El Ghachtoul, Y. (1996).** Modélisation de la relation pluie-débit à l'aide des réseaux de neurones artificiels. *Revue des sciences de l'eau* N°9/3, 319-331.
- 51) **Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M et Bergström, S. (1997).** Development and test of the distributed HB-V-96 hydrological model. *Journal of hydrology*, 201, 272-288.
- 52) **Loumagne, C. C.Michel, B.Palagos, J-C.Baudez, F.Bartoli. (1999).** D'une approche globale vers une approche semi-distribuée en modélisation pluie-débit. *La houille blanche*, N°6, 81-88.
- 53) **Loumagne, C., Michel, C. et Normand, (1988).** M.CEMAGREF, Antony. Utilisation d'indicateurs de l'état hydrique du sol dans un modèle pluie-débit. *La houille blanche* N° 5/6,
- 54) **Maison, P. (2000).** Un modèle hydrologique de suivi de la pollution diffuse en bassin versant. Approche mécaniste simplifiée de la zone non saturée. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.
- 55) **Makhlouf, Z., Michel, C. (1994).** A two-parameter monthly water balance model for French waterheds. *Journal of hydrology*, 162, 299-318.
- 56) **Michel, C. (1983).** Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre? *La Houille Blanche* 1: 39-44.
- 57) **Mouhous, N. Habouche, T. (1994).** Etude des pluies journalières maximales de l'Algérie du nord Application au bassin versant de la soummam. Note (ANRH).
- 58) **Nalbantis, I., Obled, Ch. et Rodriguez, Y. (1988).** Modélisation pluie-débit : Validation par simulation de la méthode DPFT. *La houille blanche*, N°5/6
- 59) **Nathan, R.J. et McMahon, TA (1990).** Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation. *Journal of hydrology*, 121, 217-238.

- 60) **Obled, Ch. G.M. Saulnier. (1999).** Le versant et le bassin versant : quelques aperçus sur la formation des crues et la production du ruissellement. La houille blanche, N°7/8,
- 61) **Oudin, L, Weisse, A., Loumagne, C., S. Le Hégarat-Masclé. (2003).** Assimilation of soil moisture into hydrological models for flood forecasting : a variational approach. Journal canadien de télédétection.
- 62) **Paturel, J. E., E. Servat et A. Vassiliadis (1995).** "Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data - case of the GR2M." Journal of Hydrology 168: 11-125.
- 63) **Perrin, C. (2000).** Vers une amélioration d'un modèle pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, INPGrenoble, 530p.
- 64) **Perrin, C. (2002).** Vers une amélioration d'un modèle pluie-débit au travers d'une approche comparative. La houille blanche, n°6/7, 84-91. Prix Milon 2002.
- 65) **Perrin, C., C. Michel, V. Andréassian. (2001).** Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. Journal of hydrology, 242, 275-301.
- 66) **Rasmussen, PF ; Bobée, B. et Bernier, J. (1994).** Une méthodologie générale de comparaison de modèles d'estimation régionale de crue. Revue des Sciences de l'Eau, N°7, 23-41.
- 67) **Refsgaard, J-Ch. (1997).** Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. Journal of hydrology, 198, 69-97.
- 68) **Salas, J.Y. (1993).** Analysis and modeling of hydrologic time series. Chap19. In Handbook of Hydrology, D.R. Maidment (Ed.), Mc Graw Hill, 1412p.
- 69) **Saporta, G. (1990).** Probabilités Analyse des données et statistique. Chap16, 17. Ed. Technip. Paris.
- 70) **Schaake, J. C. J. et L. Chunzen (1989).** Development and application of simple water balance models to understand the relationship between climate and water resources. IAHS 181, 343-352.
- 71) **Shamseldin, A., K-M.O'Connor, G.C.Liang. (1997).** Methods for combining the outputs of different rainfall-runoff models. Journal of hydrology, N° 197, 203-229.
- 72) **Shamseldin, A-Y. (1997).** Application of a neural network technique to rainfall-runoff modelling . Journal of hydrology, N° 199, 272-294.
- 73) **Todini. E. (1996).** The ARNO rainfall-runoff model . Journal of hydrology , N° 175, 339-382.
- 74) **Vandewiele, G. L., C.-Y. Xu et W. Huybrecht (1991).** Régionalistaion of physically - based water balance models in Belgium. Applicaton to ungauged catchments. Water Resources Management: 199 - 208.

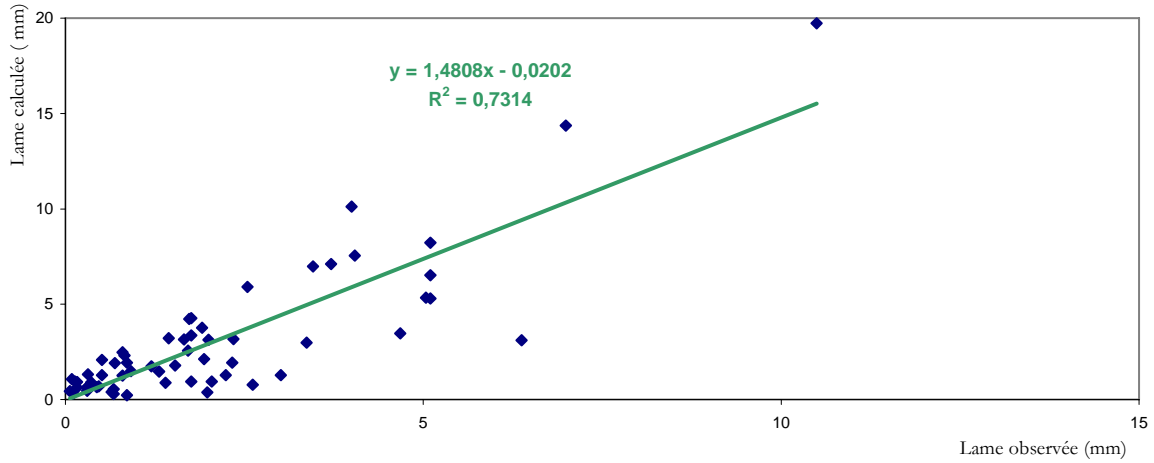
- 75) **Villeneuve, J.P., Hubert, P., Mailhot, A et Rousseau, A.N. (1998).** La modélisation hydrologique et la gestion de l'eau. Revue des sciences de l'eau, N° spécial, 19-39.
- 76) **Wang, G-T. Et S.Chen. (1996).** A linear spatially distributed model for a surface rainfall-runoff system. Journal of hydrology, 185, 183-198.
- 77) **Xu, C.-Y. et Vandewiele, G. L. (1995).** Parsimonious monthly rainfall-runoff models for humid basins with different input requirements. Advances in water resources, 18, 39-48.

### Source Internet

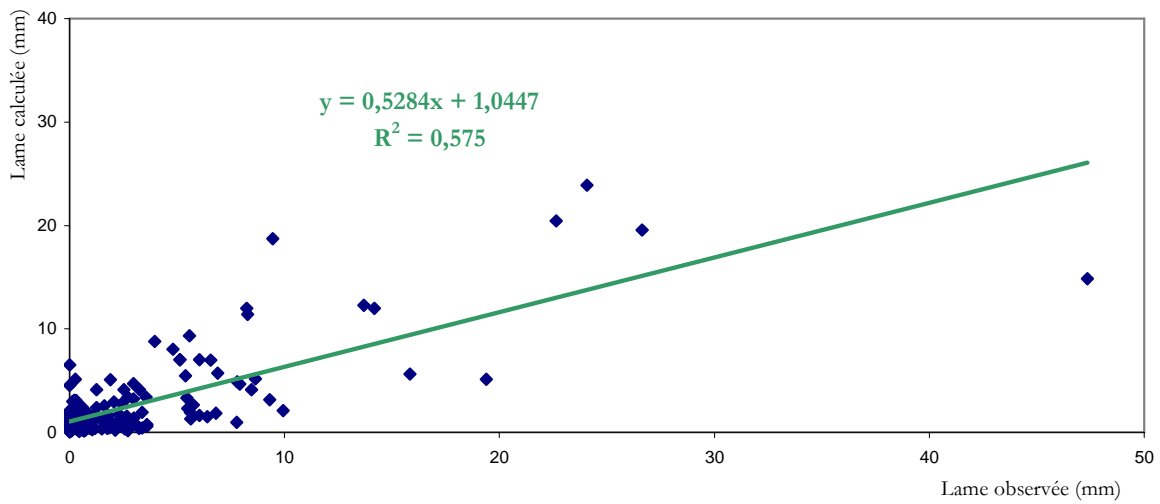
- [www.techniques.ingénieur.fr](http://www.techniques.ingénieur.fr)
- [www.Esri.com](http://www.Esri.com)
- [www.wikipedia.fr](http://www.wikipedia.fr)
- L'estimation régionale de la ressource en eau par modélisation de la pluie en débit.
- **LAVABRE, N. FOLTON et Cl MICHEL** Application à la détermination des débits de référence de la région méditerranéenne française].
- **E.Gaume Hydrologie. (2000).** cycle de l'eau et modélisation pluie-débit.
- [pastel.paristech.org/archive/00000345/00/MOUELHISafouane.pdf](http://pastel.paristech.org/archive/00000345/00/MOUELHISafouane.pdf)
- <http://doc.caren.univ-rennes1.fr/Record.htm?idlist=1&record=19111559124919397319>
- <http://www.aix.cemagref.fr/htmlpub/divisions/oiax/logiciels/loieau.htm>
- [www.aix.cemagref.fr/htmlpub/divisions/oiax/puboiax/fichiers/161Jla-1.pdf](http://www.aix.cemagref.fr/htmlpub/divisions/oiax/puboiax/fichiers/161Jla-1.pdf)
- [www.lyon.cemagref.fr/hh/Cartier/pdf/JavelleEJC03.pdf](http://www.lyon.cemagref.fr/hh/Cartier/pdf/JavelleEJC03.pdf)
- **Mouelhi, S., 2003.** Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 pp.
- **Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C. and Andréassian, V., 2005.** Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. Journal of Hydrology (in press).
- [http://www.cemagref.fr/webgr/Mod%C3%A8les/GR4J/fonctionnement\\_GR4J.htm](http://www.cemagref.fr/webgr/Mod%C3%A8les/GR4J/fonctionnement_GR4J.htm)

## Résultats de corrélation entre les débits observés et calculés par le modèle GR2M

Corrélation entre les débits observés et calculés par le GR2M (station 090101)

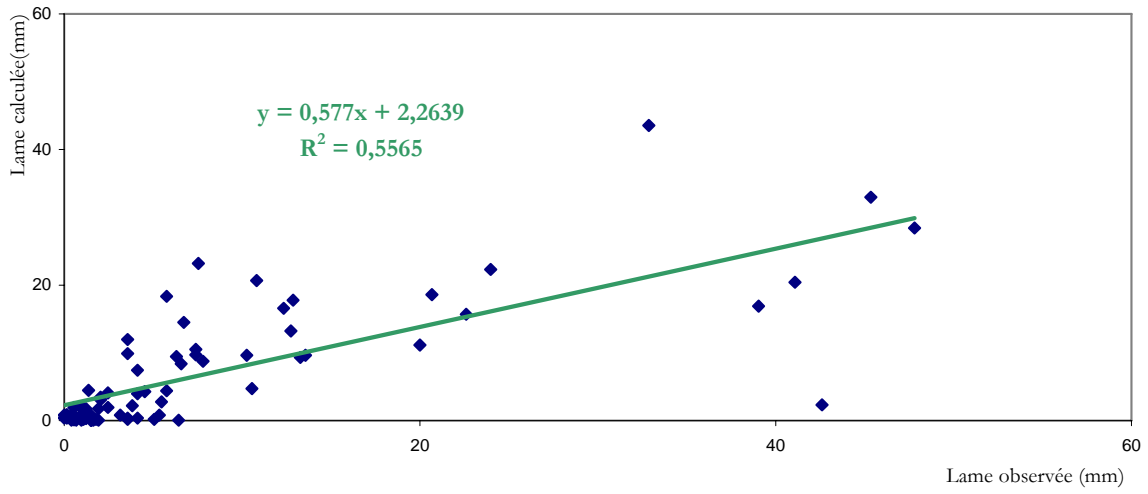


Corrélation entre les débits observés et calculés par le GR2M (station 090305)

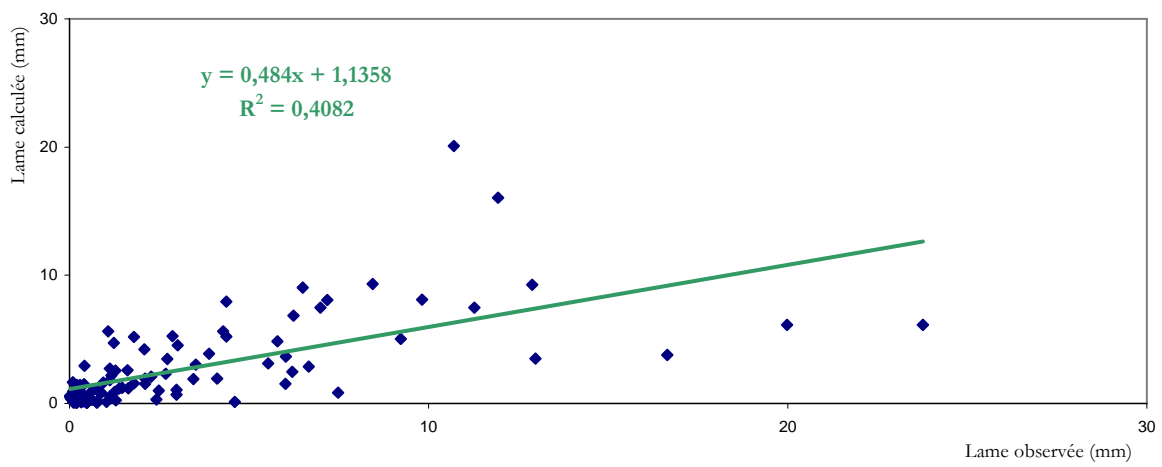




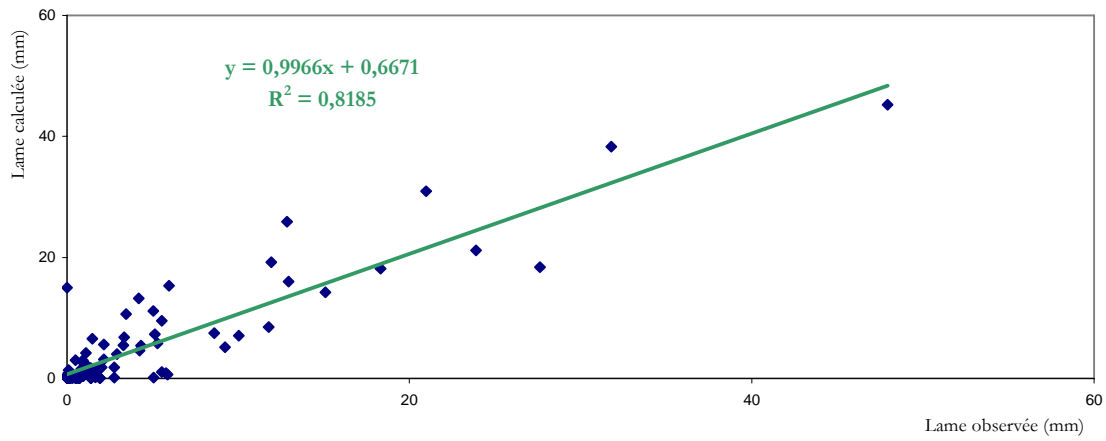
Corrélation entre les débits observés et calculés par le GR2M (station 090309)



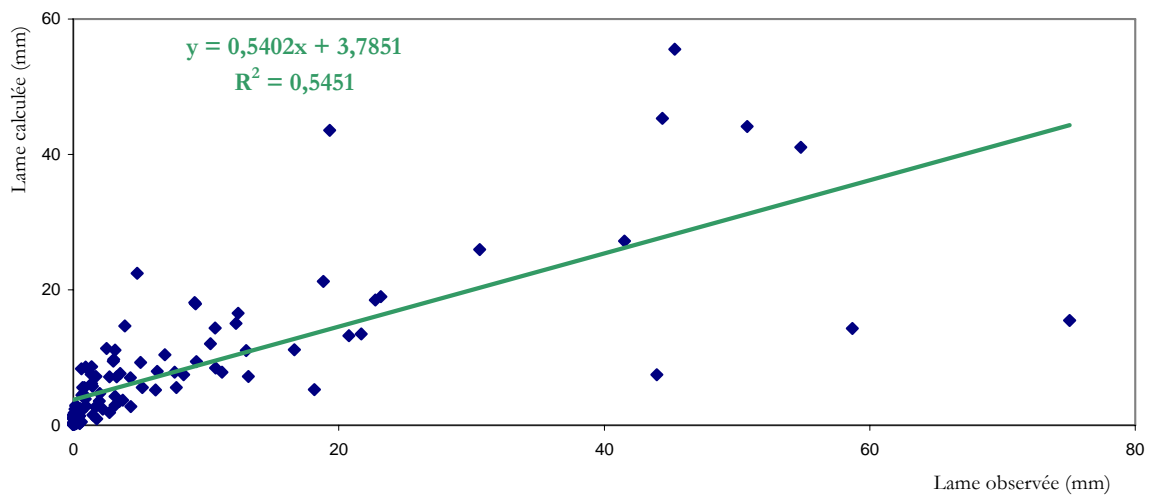
Corrélation entre les débits observés et calculés par le GR2M (station 090408)



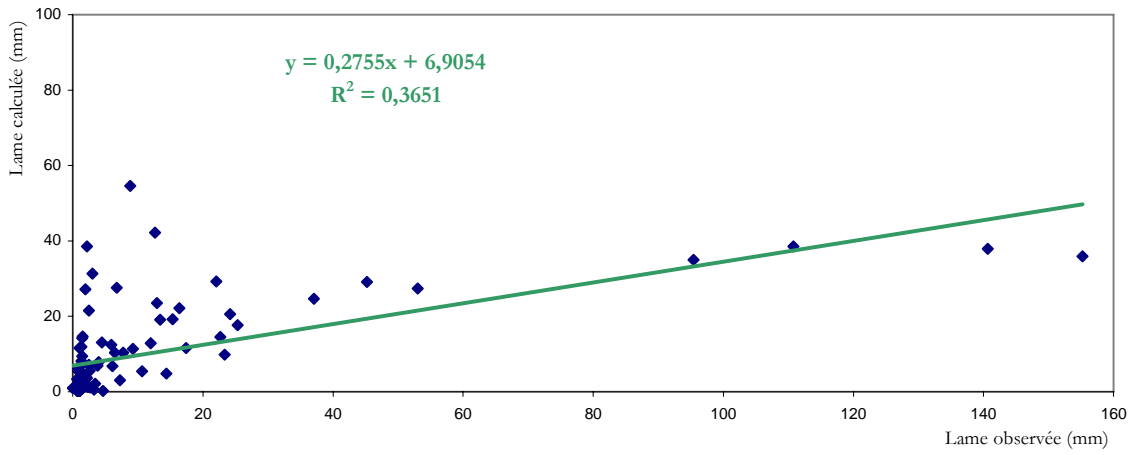
Corrélation entre les débits observés et calculés par le GR2M (station 090501)



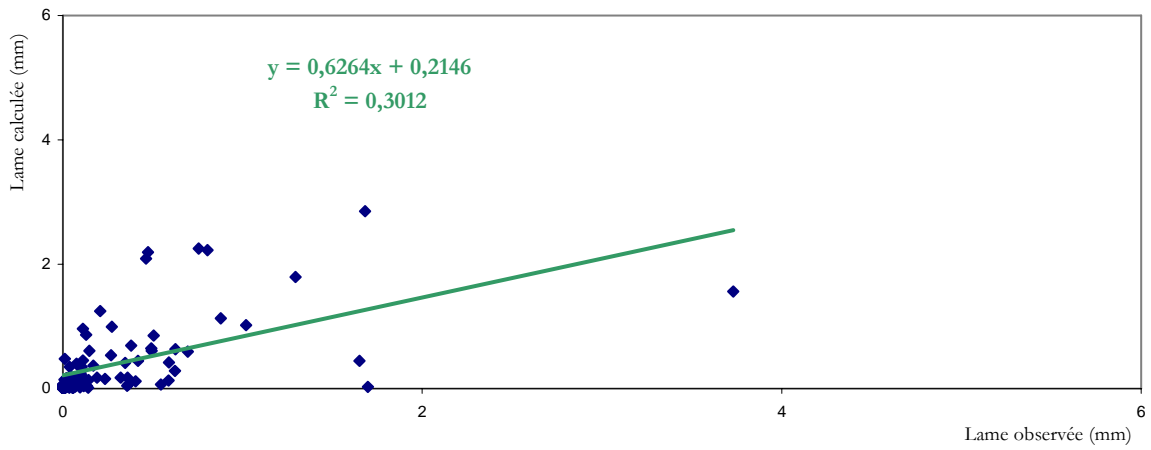
Corrélation entre les débits observés et calculés par le GR2M (station 150106)



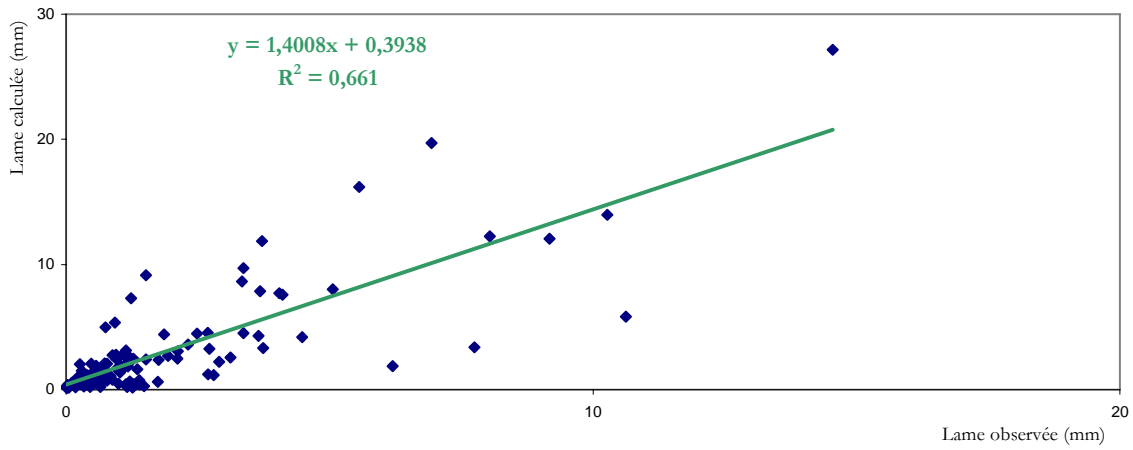
Corrélation entre les débits observés et calculés par le GR2M (station 150601)



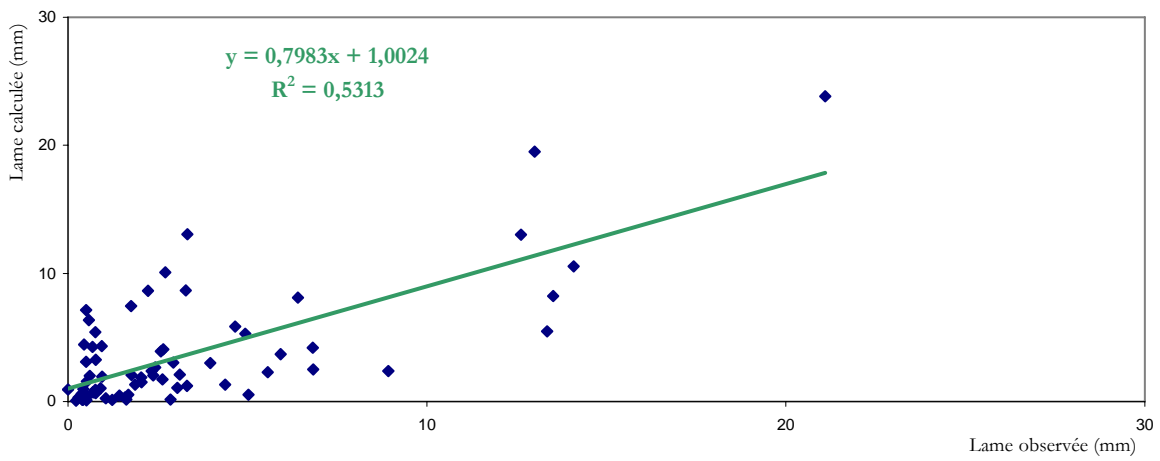
Corrélation entre les débits observés et calculés par le GR2M (station 150702)



Corrélation entre les débits observés et calculés par le GR2M (station 150901)

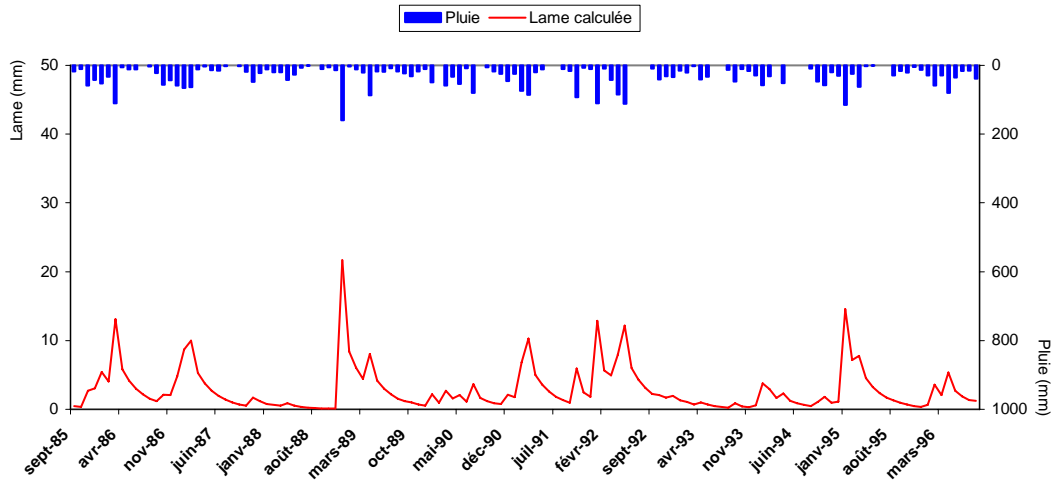


Corrélation entre les débits observés et calculés par le GR2M (station 151001)

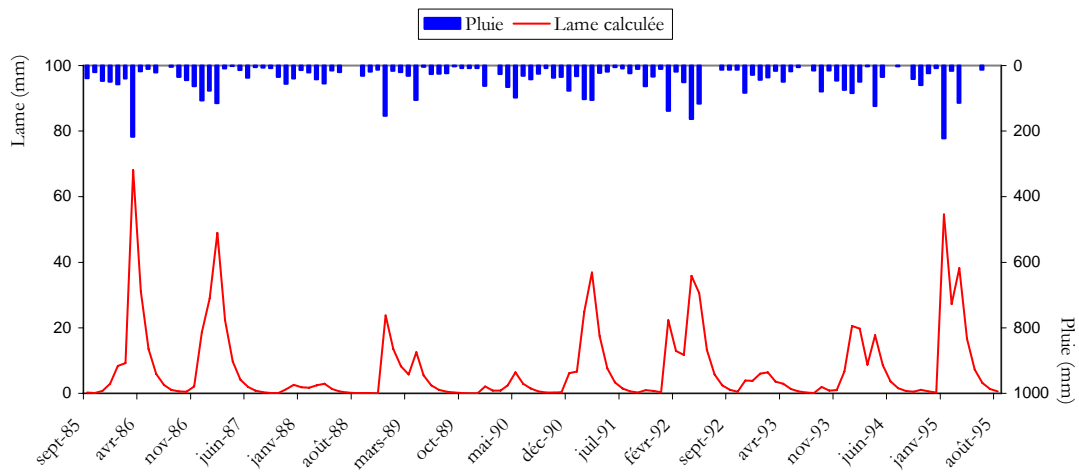


## Résultats d'extension des séries de données par le modèle GR2M

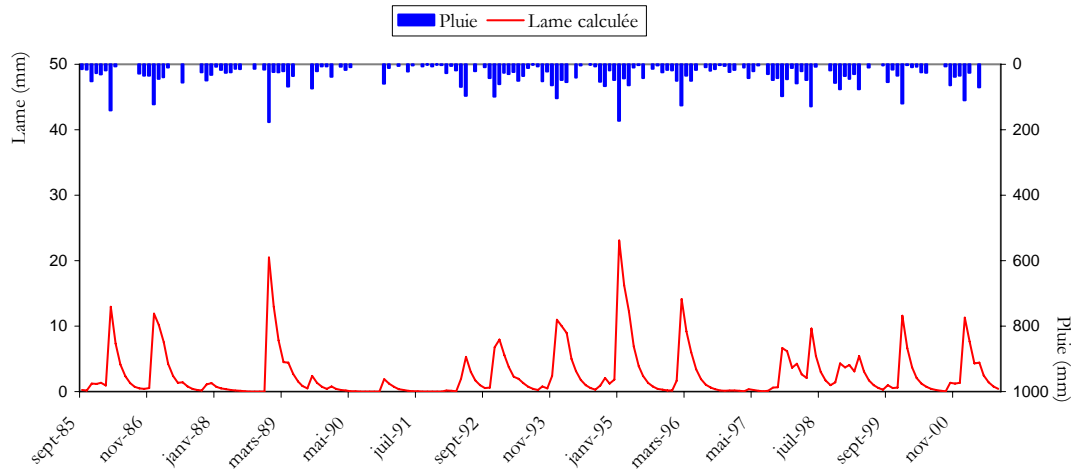
Extension de la série de données de la station 090101 par le modèle GR2M



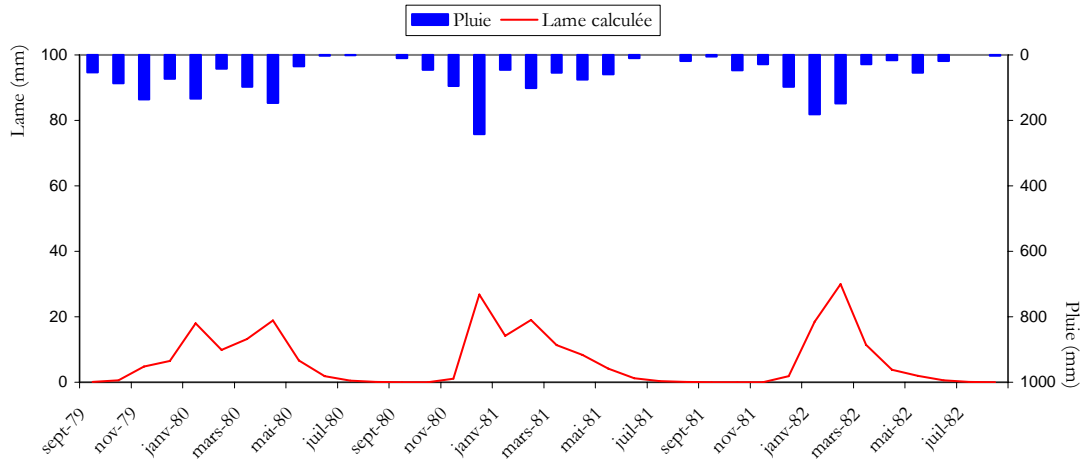
Extension de la série de données de la station 090309 par le modèle GR2M



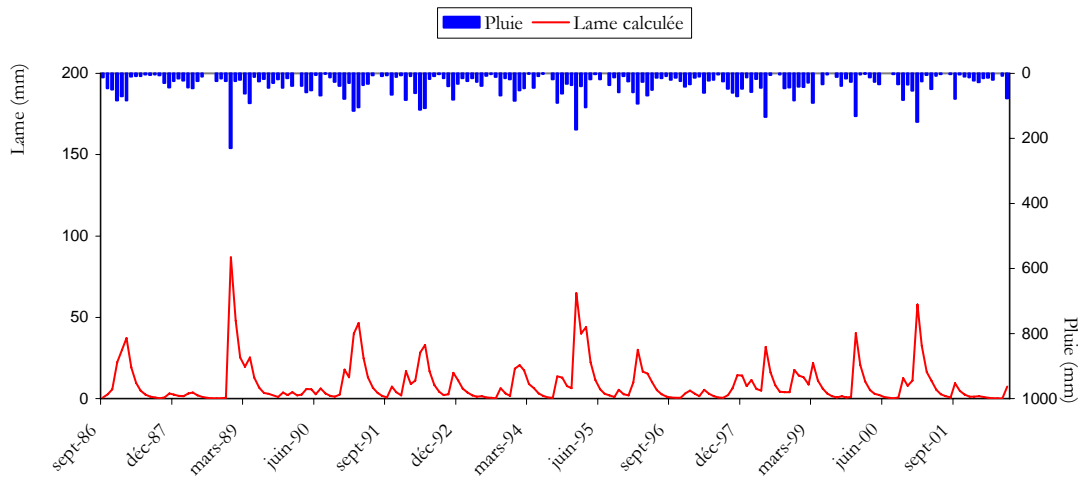
### Extension de la série de données de la station 090408 par le modèle GR2M



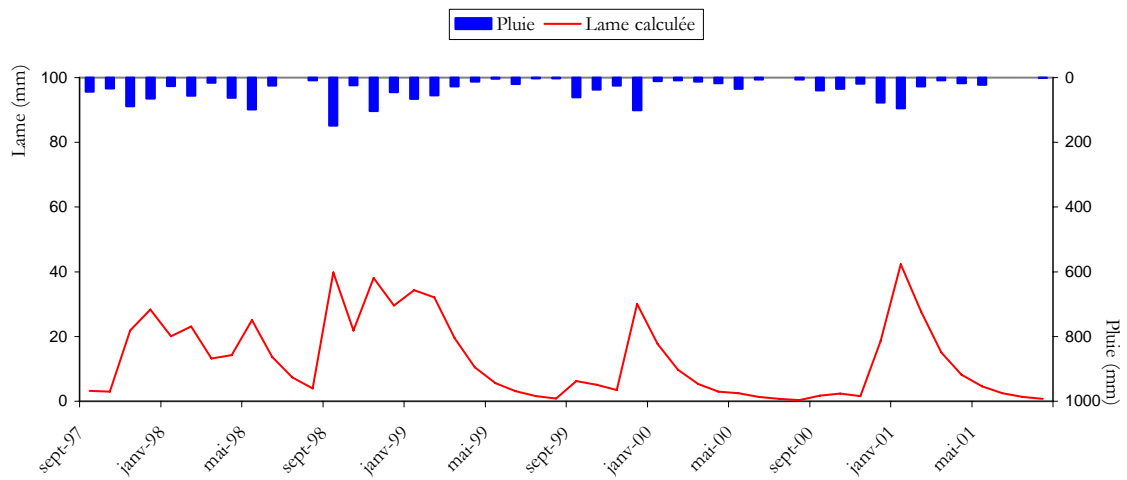
### Extension de la série de données de la station 090501 par le modèle GR2M



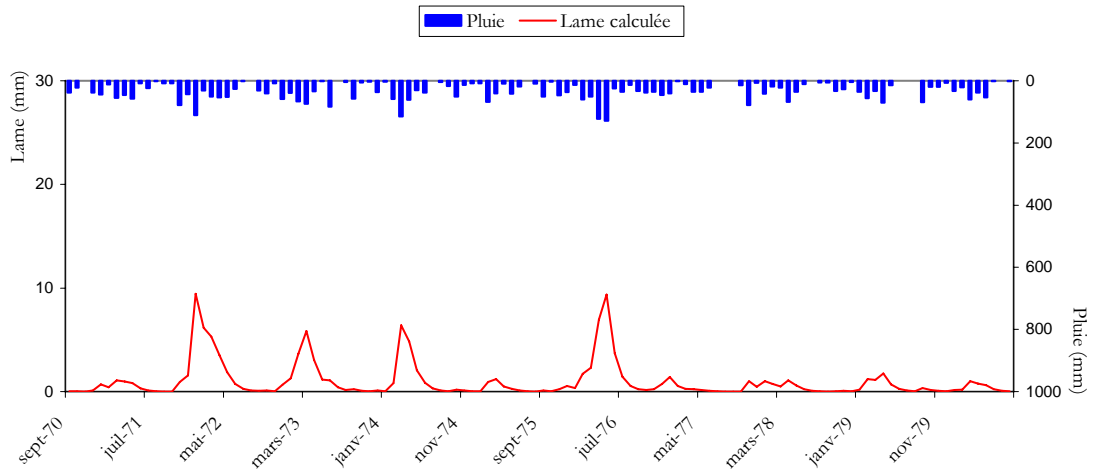
### Extension de la série de données de la station 150106 par le modèle GR2M



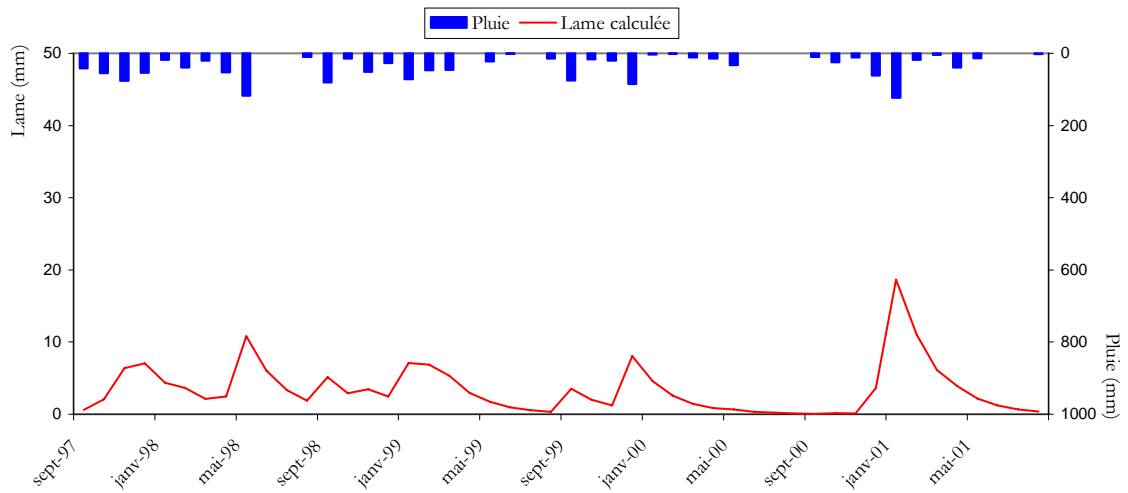
### Extension de la série de données de la station 150601 par le modèle GR2M



Extension de la série de données de la station 150702 par le modèle GR2M

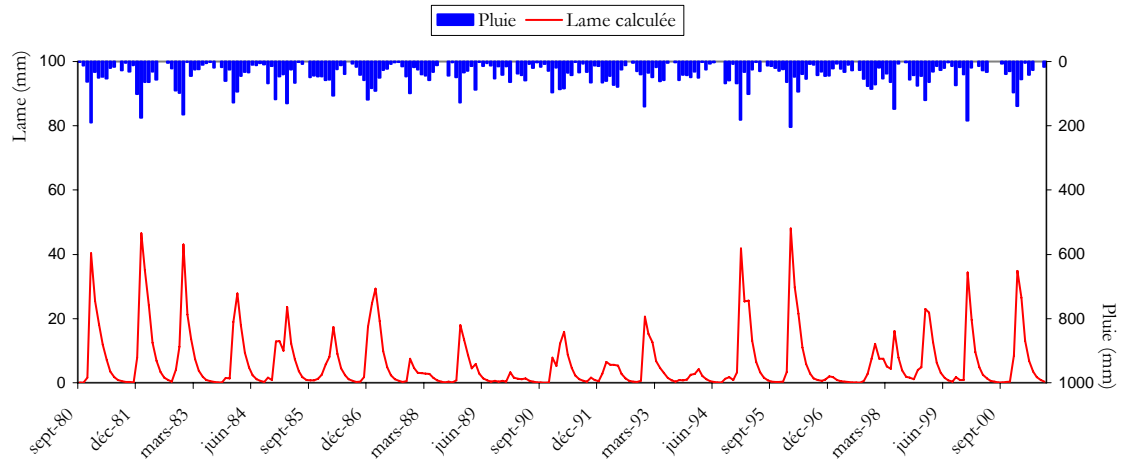


Extension de la série de données de la station 150901 par le modèle GR2M



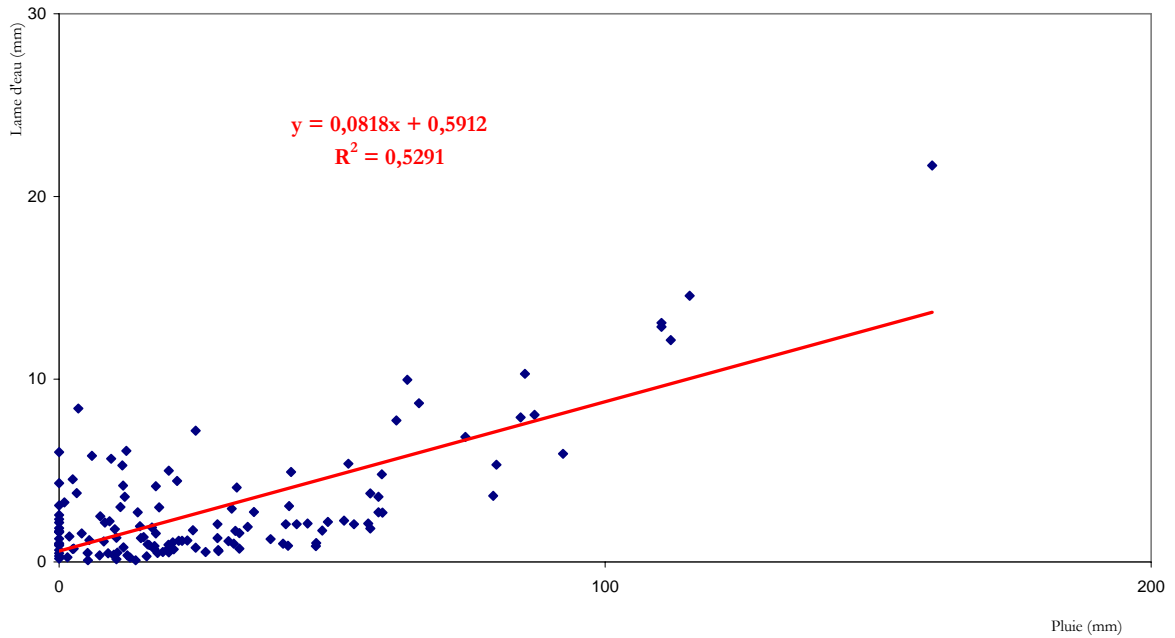


Extension de la série de données de la station 151001 par le modèle GR2M

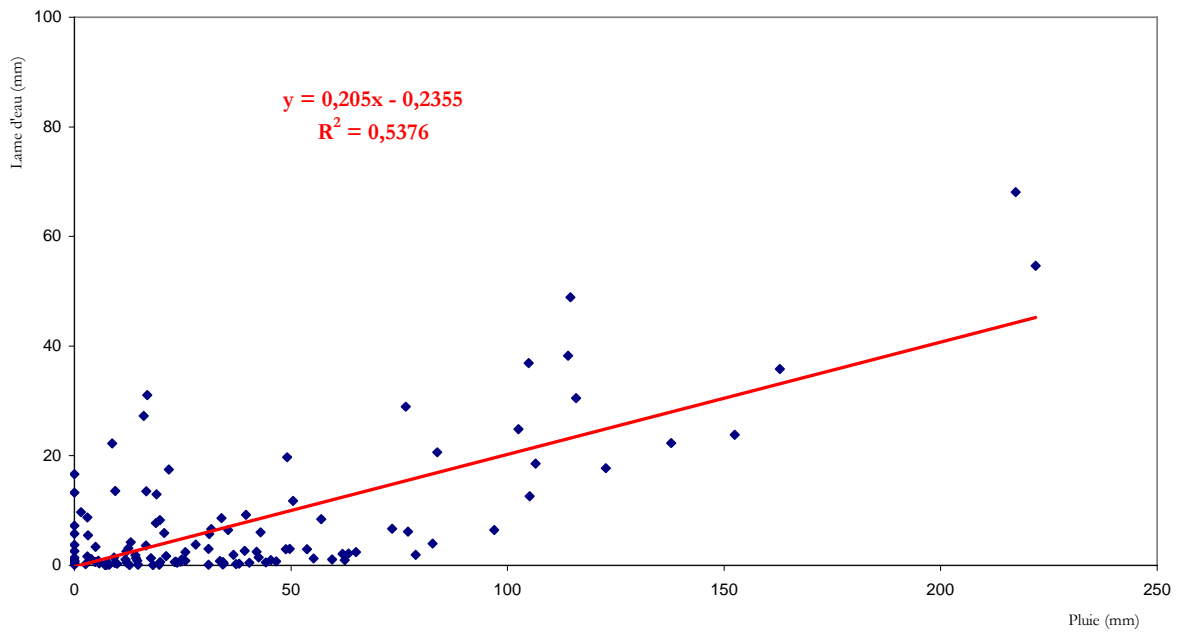


## Résultats de corrélation entre les pluies et débits générés

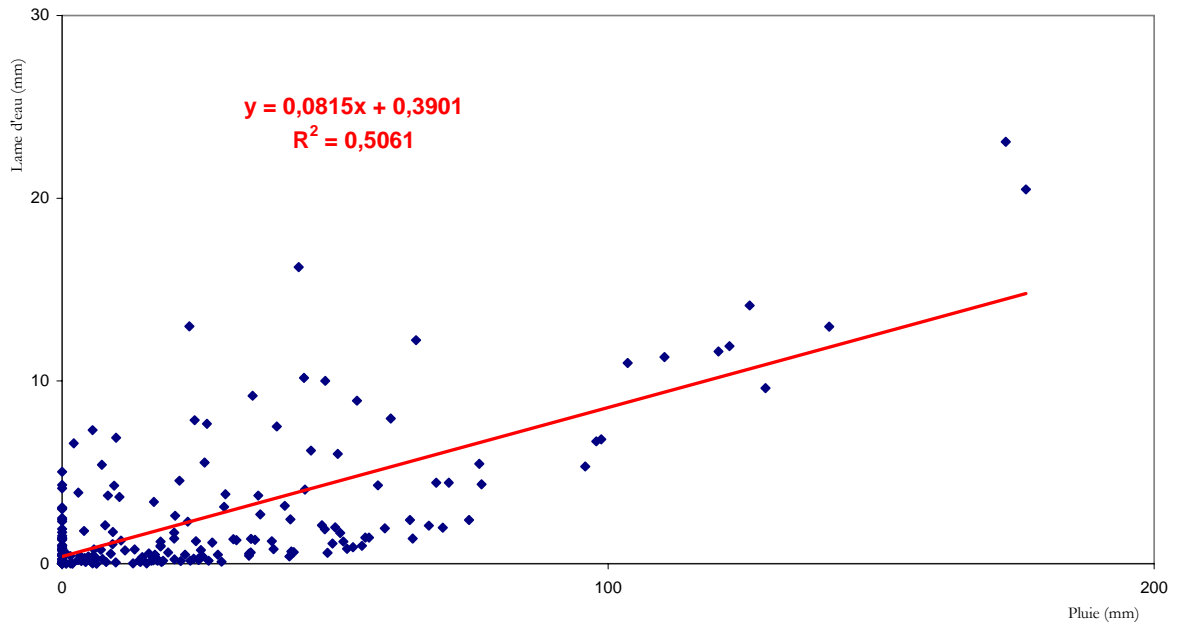
Corrélation entre les pluies et débits générés (090101)



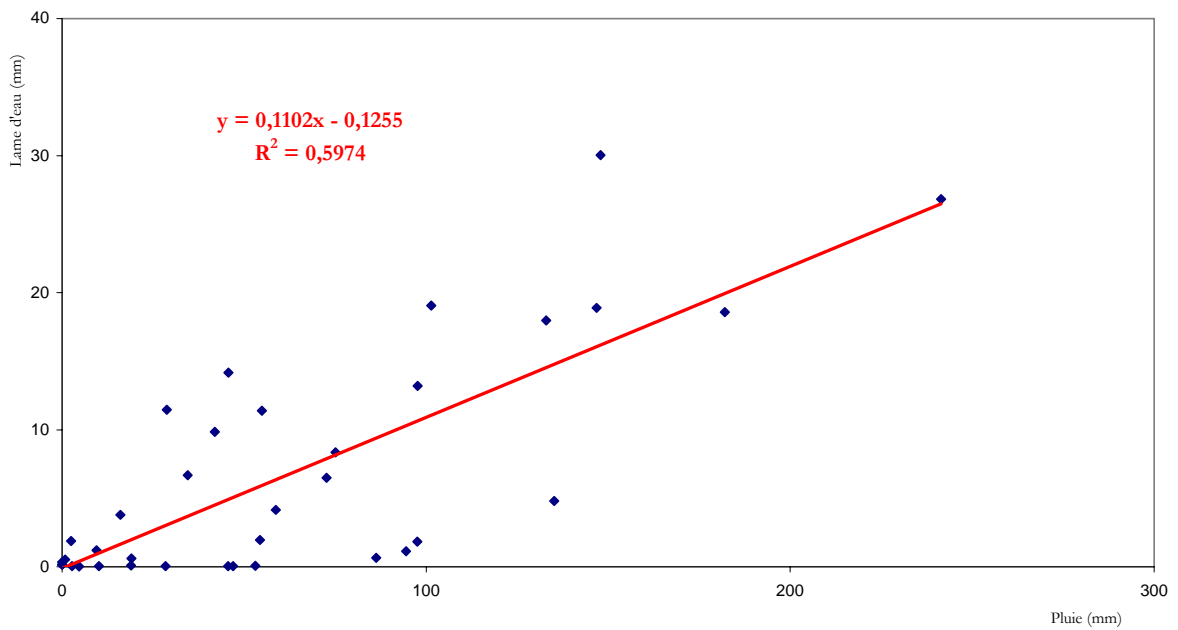
Corrélation entre les pluies et débits générés (090309)



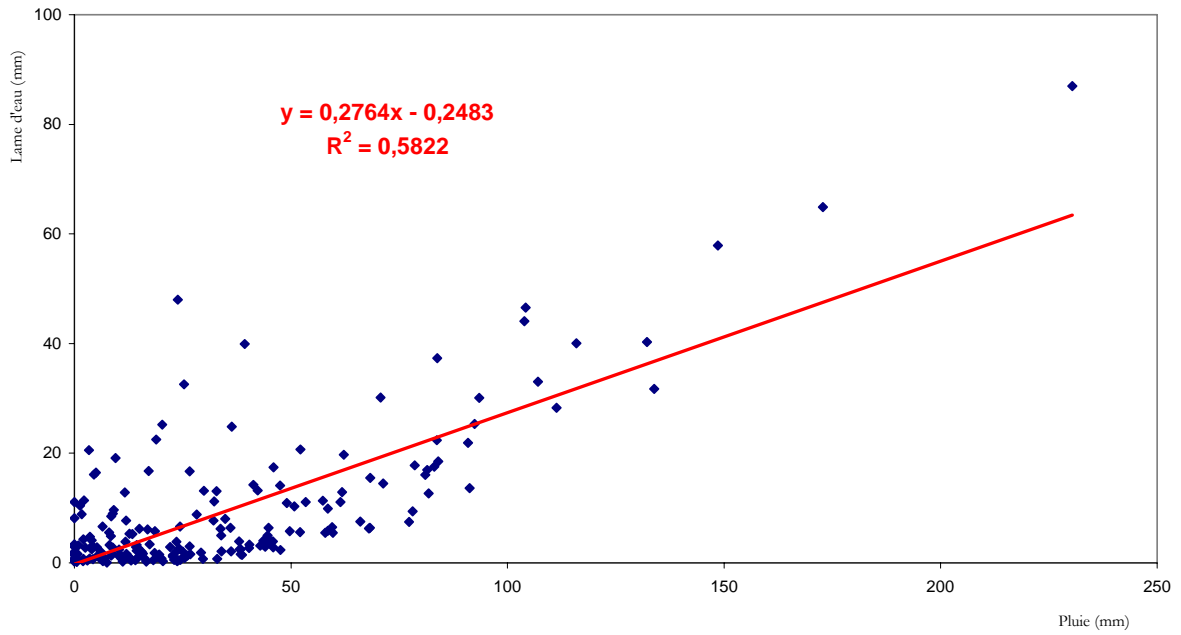
Corrélation entre les pluies et débits générés (090408)



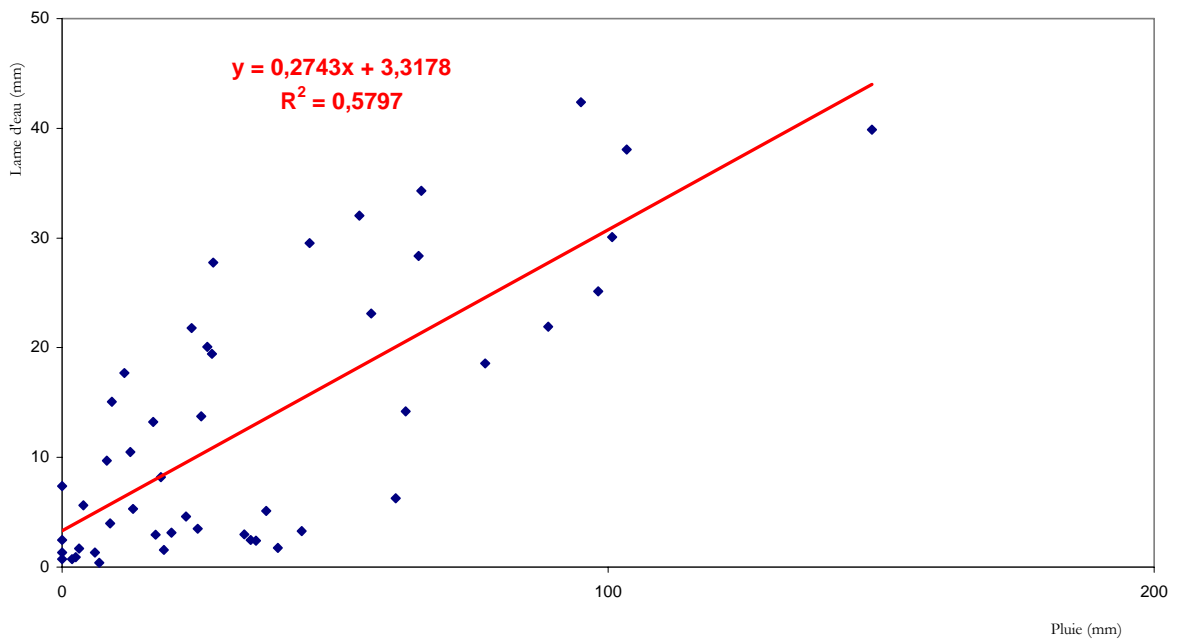
Corrélation entre les pluies et débits générés (090501)



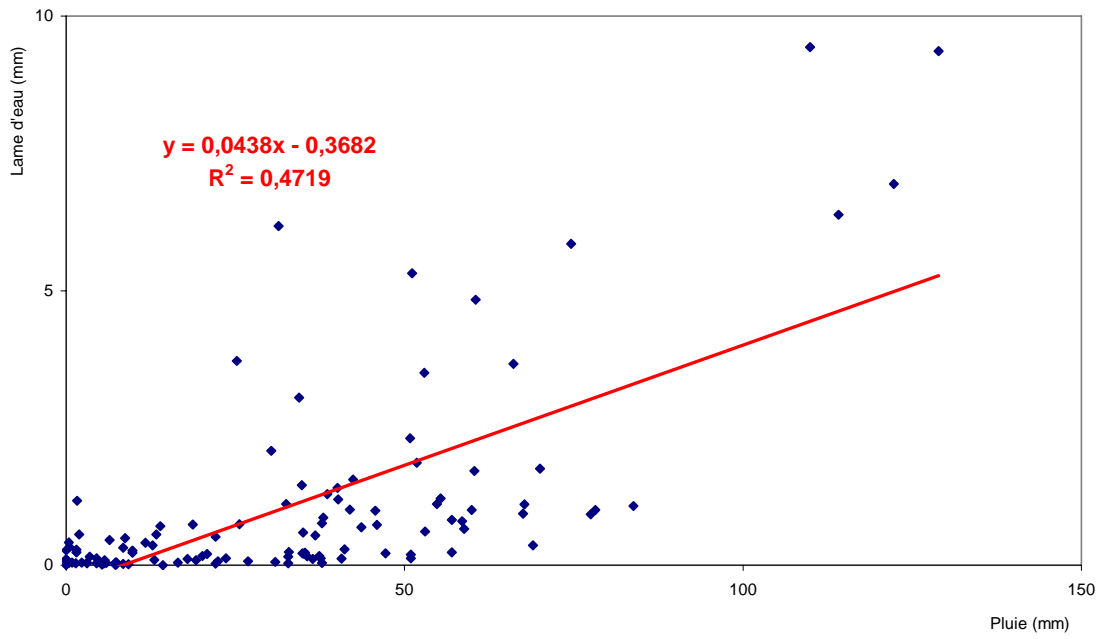
Corrélation entre les pluies et débits générés (150106)



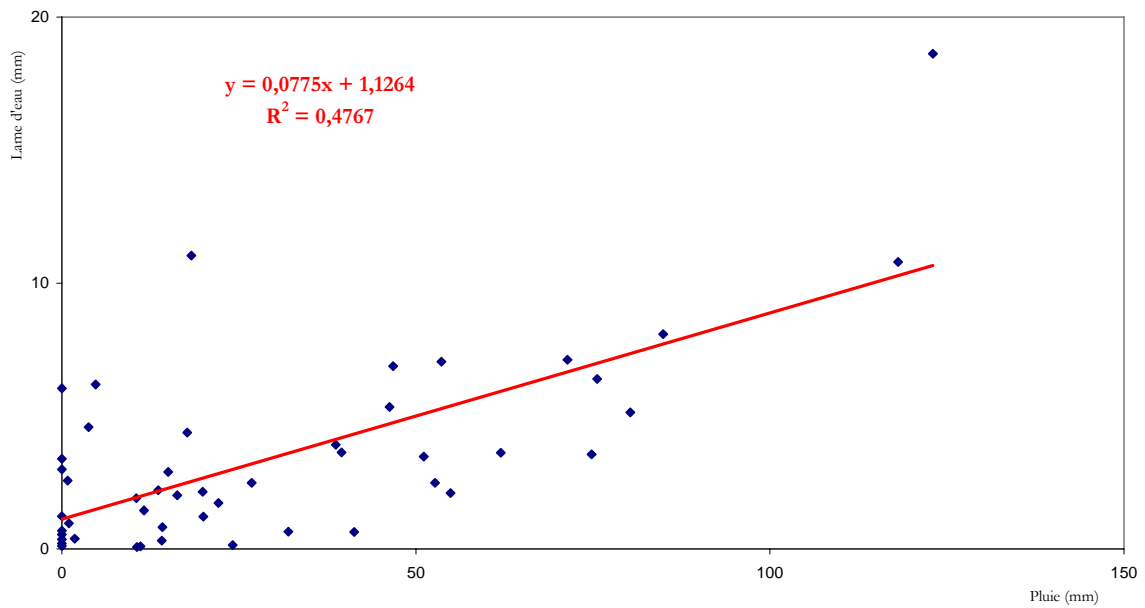
Corrélation entre les pluies et débits générés (150601)



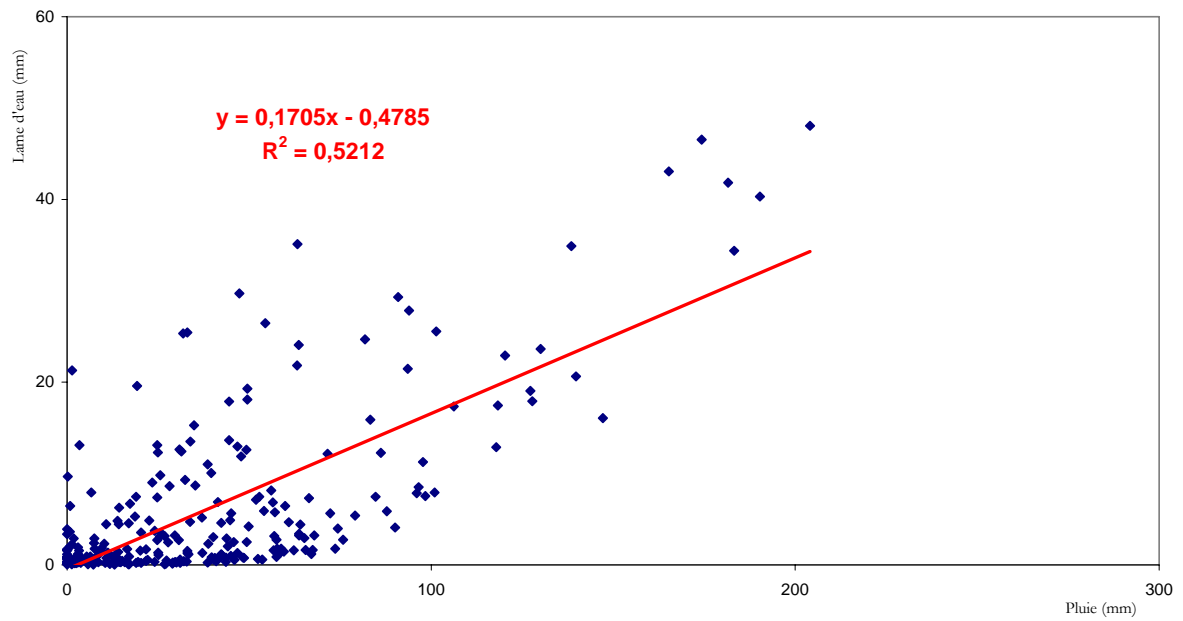
Corrélation entre les pluies et débits générés (150702)



Corrélation entre les pluies et débits générés (150901)

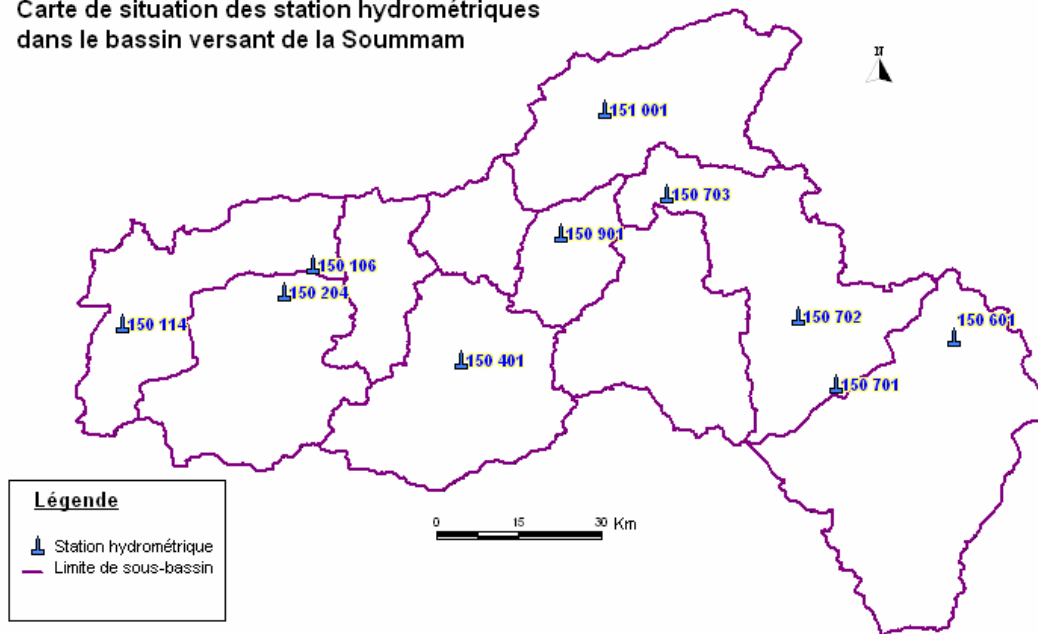


Corrélation entre les pluies et débits générés (151001)

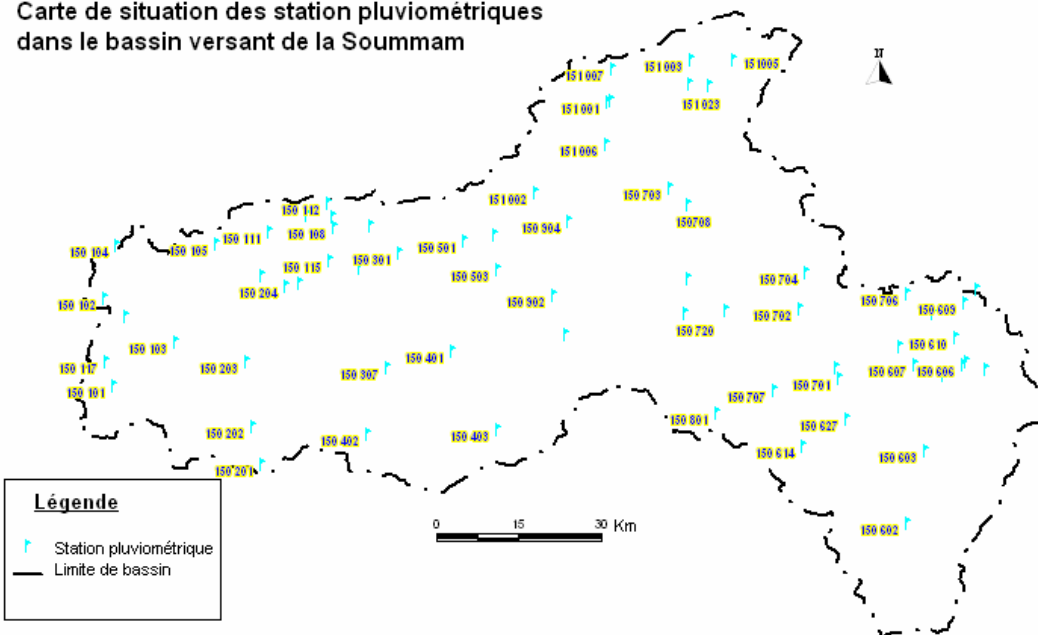


# **ANNEXE-CARTES**

### Carte de situation des station hydrométriques dans le bassin versant de la Soummam

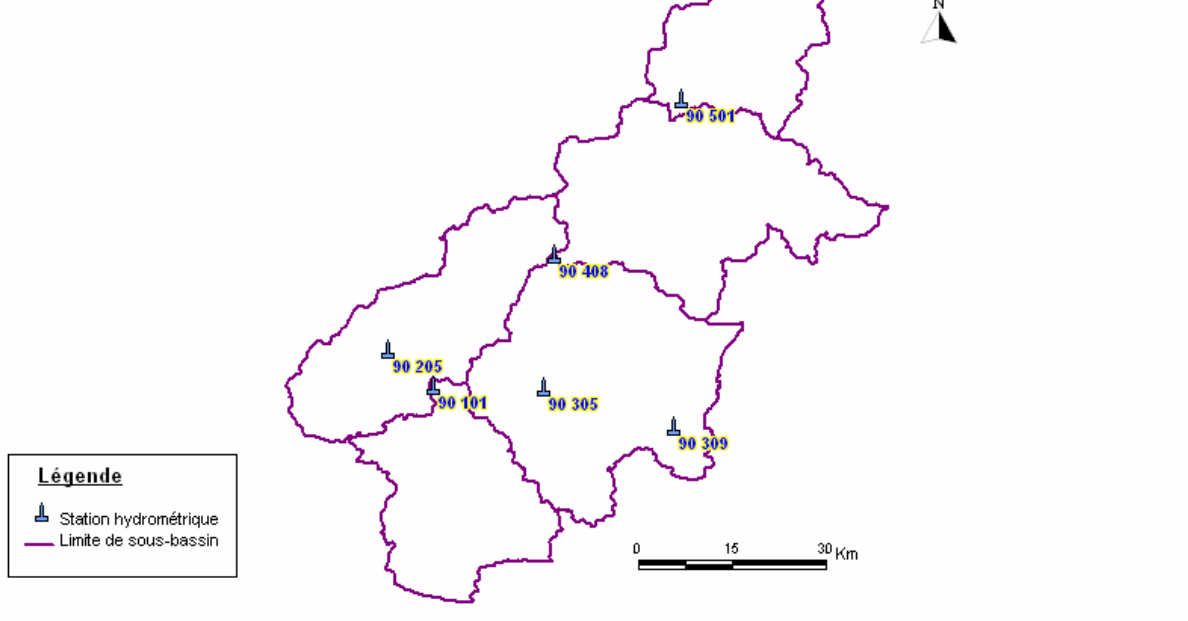


### Carte de situation des station pluviométriques dans le bassin versant de la Soummam

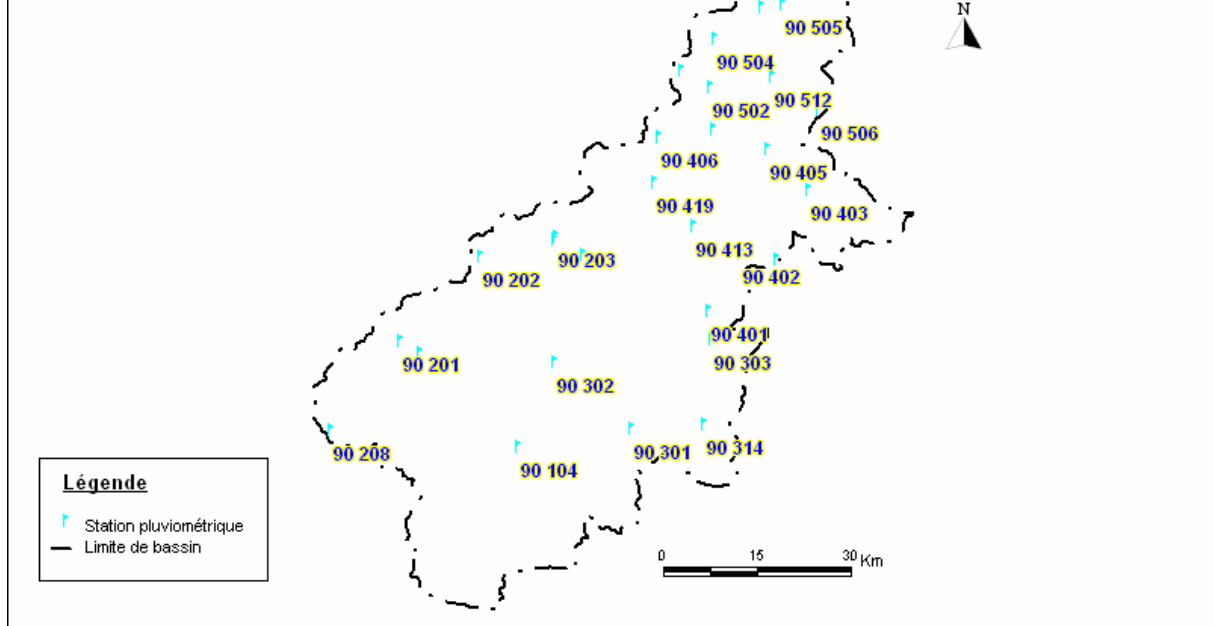




Carte de situation des stations hydrométriques  
dans le bassin versant de l'Isser

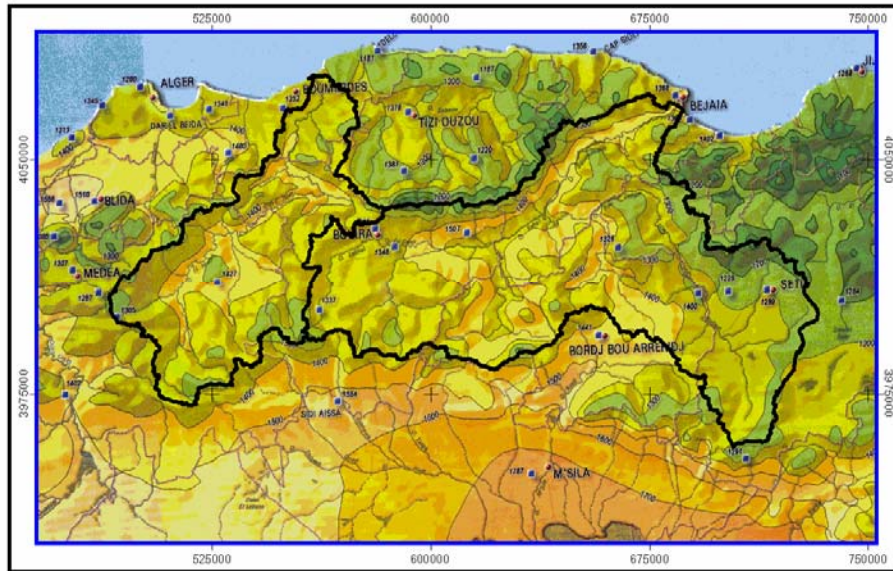


Carte de situation des stations pluviométriques  
dans le bassin versant de l'Isser



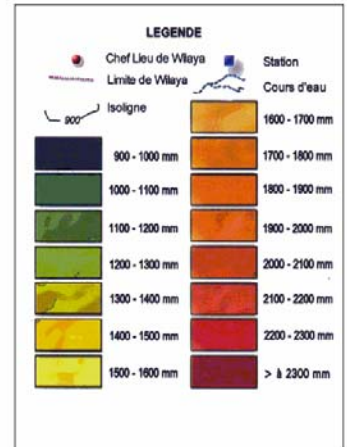


Carte de l'ETP moyenne annuelle des bassins versants de la Soummam et de l'Isser

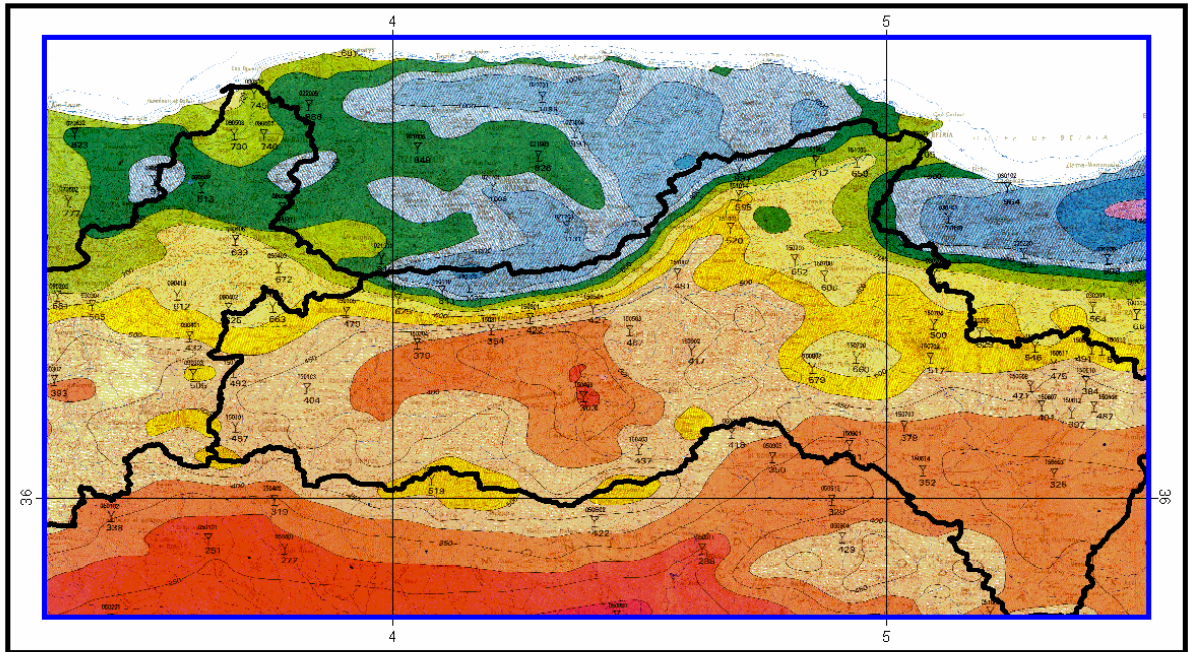


30 0 30 60 Kilometers

projection cartographique utm zone 31 wgs 84



Carte de la pluviométrie moyenne annuelle des bassins versants de la Soummam et de l'Isser



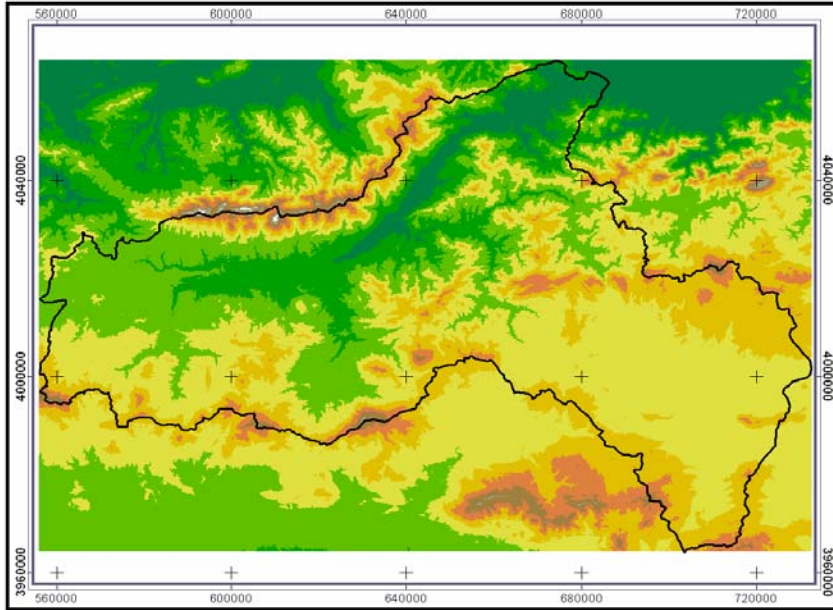
20 0 20 40 Kilometers

projection géographique wgs 84

**LEGENDE**

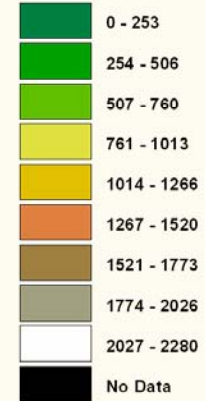
Graduation des isohyètes	Plage de pluviométrie	Graduation des isohyètes	Plage de pluviométrie
150 mm	moins de 200 mm	700 mm	de 600 à 700 mm
200 mm		800 mm	de 700 à 800 mm
250 mm	de 200 à 300 mm	900 mm	de 800 à 900 mm
300 mm		1000 mm	de 900 à 1000 mm
350 mm	de 300 à 400 mm	1200 mm	de 1000 à 1200 mm
400 mm		1400 mm	de 1200 à 1400 mm
450 mm	de 400 à 500 mm	1600 mm	de 1400 à 1600 mm
500 mm		1800 mm	de 1600 à 1800 mm
600 mm	de 500 à 600 mm	2000 mm	plus de 1800 mm

**Modèle Numérique de Terrain du Bassin versant de la Soummam**



**Legende**

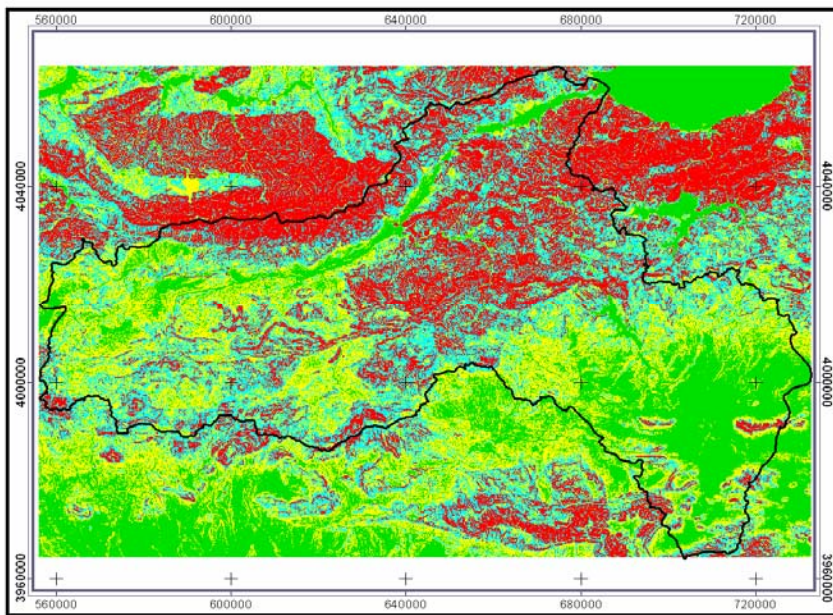
Altitude en mètres



40 0 40 Km

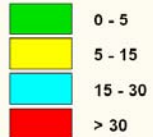
Projection cartographique WGS 84 UTM zone 31

**Carte des pentes du Bassin versant de la Soummam**



**Legende**

Pente en (%)

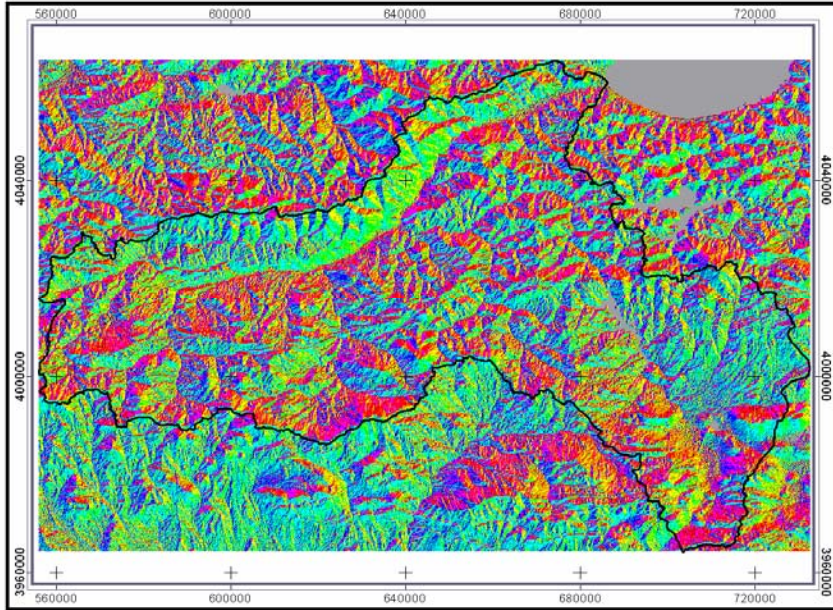


40 0 40 Km

Projection cartographique WGS 84 UTM zone 31



Carte des expositions du Bassin versant de la Soummam



**Legende**

exposition en degrés

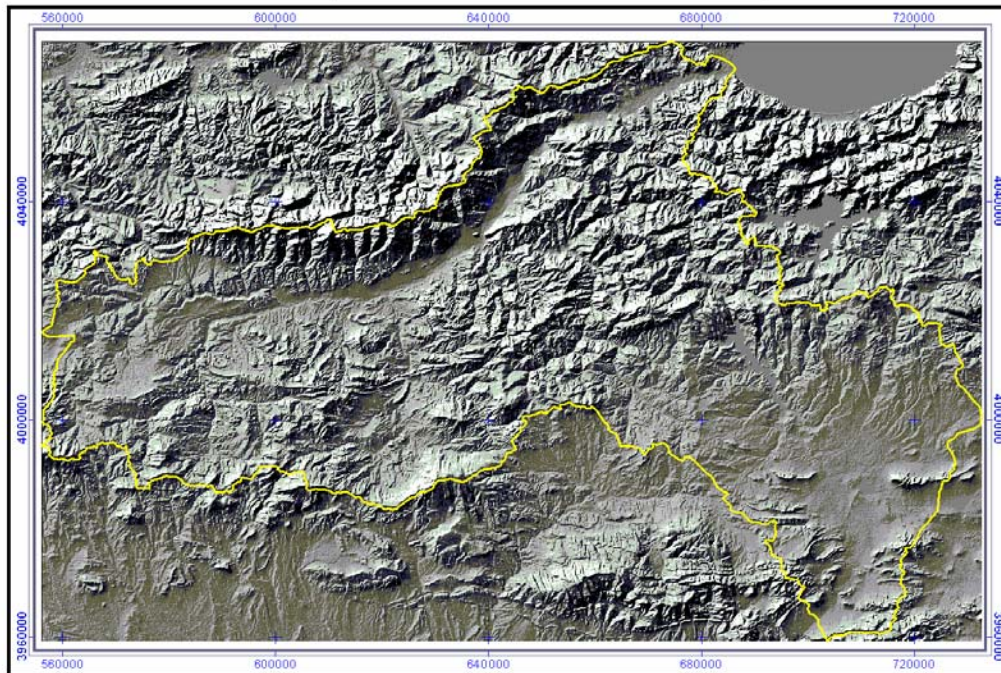
- Flat (-1)
- North (0-22.5, 337.5-360)
- Northeast (22.5-67.5)
- East (67.5-112.5)
- Southeast (112.5-157.5)
- South (157.5-202.5)
- Southwest (202.5-247.5)
- West (247.5-292.5)
- Northwest (292.5-337.5)
- No Data

40 0 40 Km

Projection cartographique WGS 84 UTM zone 31

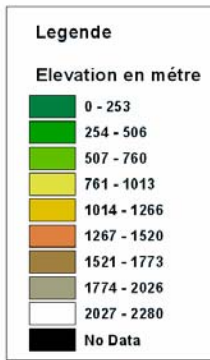


Carte du relief du Bassin versant de la Soummam

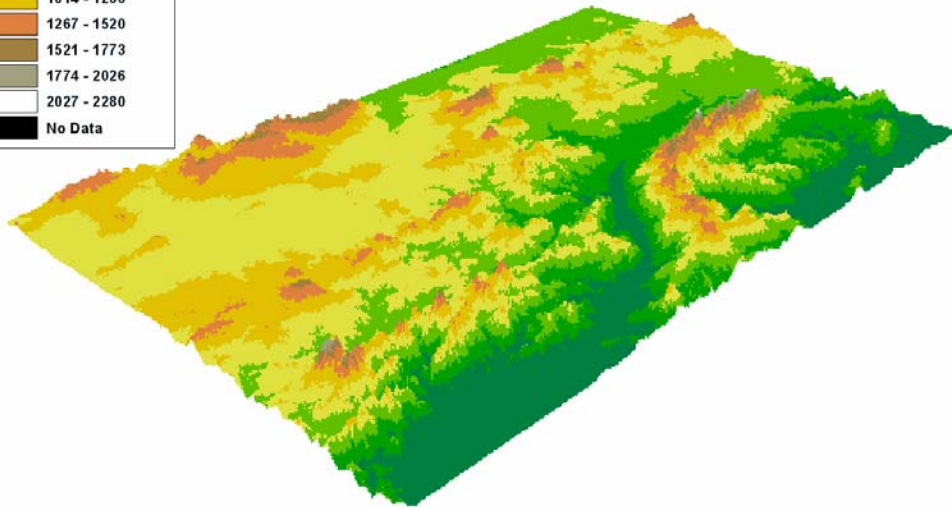


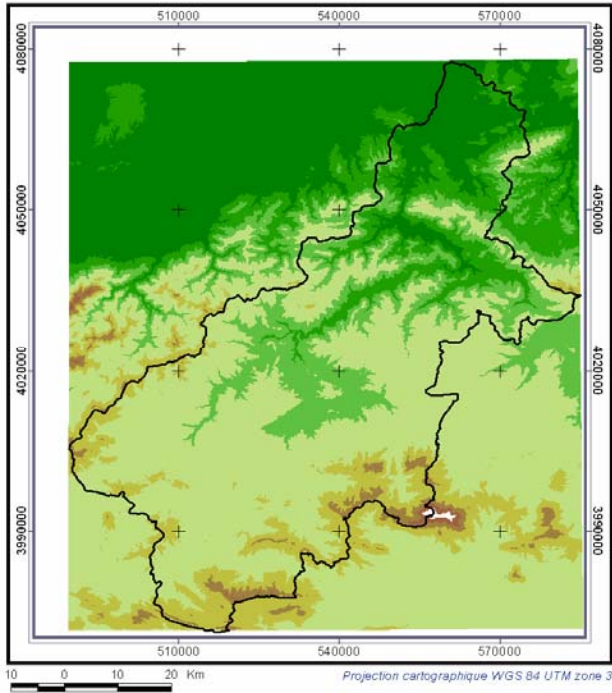
20 0 20 40 Kilometers

Projection cartographique WGS 84 UTM zone 31

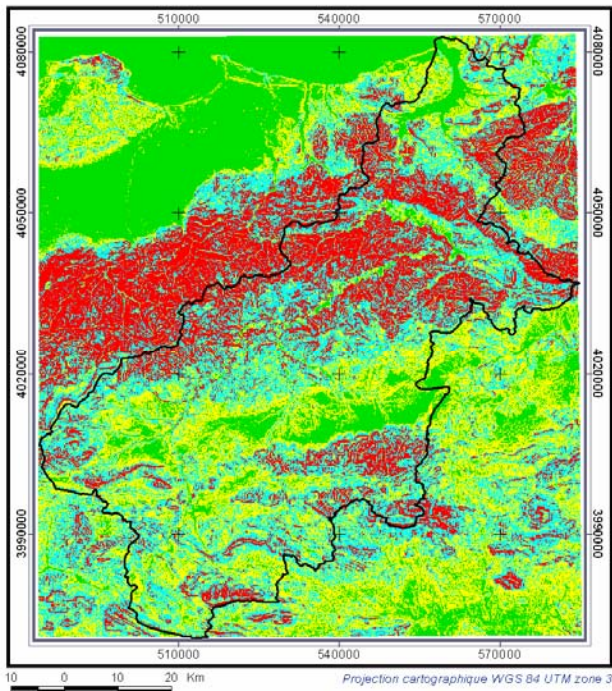
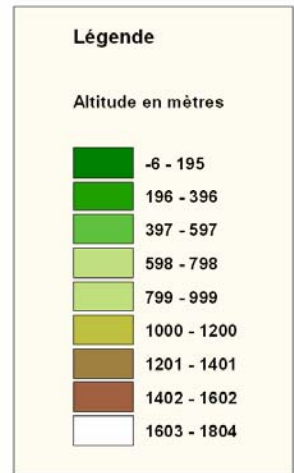


Carte en 3D du bassin versant de la Soummam



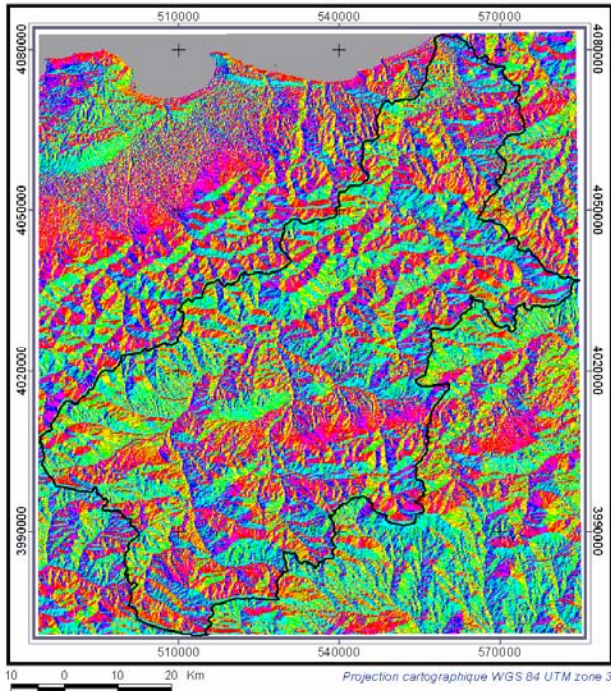


**Modèle Numérique de Terrain du bassin versant de l'Isère**



**Carte des pentes du bassin versant de l'Isère**













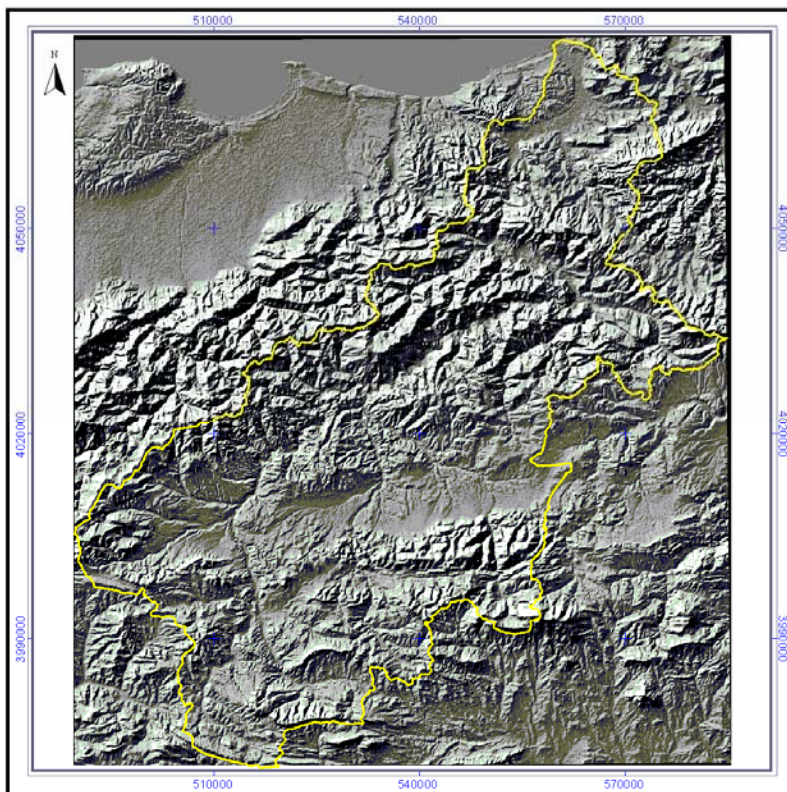


**Carte des expositions du bassin versant de l'Isser**

**Légende**

Exposition en degré

-  Flat (-1)
-  North (0-22.5, 337.5-360)
-  Northeast (22.5-67.5)
-  East (67.5-112.5)
-  Southeast (112.5-157.5)
-  South (157.5-202.5)
-  Southwest (202.5-247.5)
-  West (247.5-292.5)
-  Northwest (292.5-337.5)
-  No Data



**Carte du relief du bassin versant de l'Isser**

Projection cartographique WGS 84 UTM zone 31

0 9 18 Kilometers



**Légende**

Altitude en mètre

1600 - 1800
1400 - 1600
1200 - 1400
1000 - 1200
800 - 1000
600 - 800
400 - 600
200 - 400
-10 - 200

**Vue en 3D du bassin Versant de l'Isser**

